

Analysis of EMF Mitigation Characteristic for Transmission Tower Using Compact Insulation Arm

宋洪俊* · 李源教** · 李相潤** · 崔仁赫*** · 李東一† · 邊其植§

(Hong-Jun Song · Won-Kyo Lee · Sang-Yun Lee · In-Hyeok Choi · Dong-Il Lee · Ki-Sik Byeon)

Abstract - As electrical power demand is gradually increasing, the construction of power transmission facility is unavoidable. However difficulties which resulted from increasing of complaints and NYMBY make power transmission tower to be more environmentally friendly. As an alternative proposal, a new method which is changing conventional iron arm for insulation arm which is made of FRP(Fiber Glass Reinforced Plastics) is in progress. In this paper, we discussed environmentally friendly characteristic of domestic 154 kV testing transmission tower whose insulation arms have same mechanical and excellent electrical properties compare to conventional heavy iron arm.

Key Words : FRP(Fiber Glass Reinforced Plastics), Insulation Arm, Transmission Tower

1. 서론

최근 송전선로의 환경특성에 대한 관심이 높아지면서 송전선로의 설계, 건설 및 운영관점에서 환경요소에 대한 검토가 우선적인 설계요소의 하나로 부각되고 있다. 한편, 송배전용 가공설비에 사용되는 옥외 절연물로 자기(Porcelain)나 유리(Glass) 소재의 애자가 주로 사용되어 왔지만, 20여년 전부터는 전기적 및 기계적 성능이 우수한 폴리머복합애자(Polymer Composite Insulator)가 사용되기 시작하였다. 최근에는 배전설비는 물론 송전설비에도 300 kV급이하 전압계급까지 보편화되기 시작하였다. 폴리머복합애자의 적용성 확대와 보다 증대된 기계적 성능특성을 개발함에 따라 기존 자기 애자의 대체에서 더 나아가 송배전설비의 절제암을 고강도의 절연암으로 대체하려는 시도가 진행되고 있다[1].

산업의 대규모화와 도시의 과밀화로 매연과 분진에 의한 절연물의 오손이 증가되고 있고 전력 부하가 밀집된 도시의 공단지역은 대부분이 염해가 있는 해안 지역에 위치하고 있기 때문에 표면방전에 의한 외피 소재의 열화내성이 중요한 인자로 부각되고 있다. 이러한 관점에서 폴리머애자는 이러한 조건을 극복하기 위하여 기계적 강도유지를 위한 FRP(Fiber Glass Reinforced Plastics) Core와 표면절연성능유지를 위한 고무 갓(shed)으로 구성되어 있다.

폴리머 애자의 폴리머 갓 소재는 자기재 소재에 비하여 내열성과 내후성이 부족하지만 오염과 습도가 높은 환경하에서 애자의 표면절연성능은 훨씬 우수한 특성을 지니고 있다. 폴리머애자용 갓 소재는 트래킹성(재료침식), 내광성, 산화안정성 등의 성능이 우수하므로 오염으로 인해 재료열화가 가속되는 환경에서도 장기성능이 매우 좋게 나타나고 있다[2].

폴리머애자의 우수성이 입증되면서 국내의 배전급 절연물 뿐만 아니라 전철용 절연물과 초고압의 대형 절연물도 자기재 애자에서 폴리머 절연물로 확대 적용 중이어서 신규절연물의 상당량이 폴리머 복합애자로 대체될 전망이다. 송전선로 경우에도 경과치 확보가 어렵고 환경 문제가 부각되면서 그 해결책으로 암 절연물을 활용한 최적화된 철탑 제작을 위한 연구가 진행되어 왔다. 이와 같은 연구의 일환으로 국내 고분자 절연체 제작업체와 협력하여 친환경적인 Compact 철탑을 시개발하여 설치하였다[3].

본 논문에서는 고압 송전선로로부터 발생하는 코로나에 의한 가청소음(Audible Noise), 라디오 방해(Radio Interference), TVI(TV Intereference), 전자계(Electromagnetic Field)등과 같은 전기환경 방해요소들 중, 154 kV 송전선로 설계에서 가장 우선적으로 고려해야하는 전자계(Electromagnetic Field) 발생량을 전기환경 모의프로그램을 이용하여 계산하였고 전기환경 특성을 기존의 송전철탑과 고분자 절연암을 사용한 Compact 철탑으로 비교 분석하였다[4]. 한편, 현재 상용 선로 중 지상고가 4.9 m로 낮아 지표면 전계 및 자계 노출이 강한 154 kV 신송T/L에 대하여 같은 지상고 조건에서 Compact 철탑의 경우와 비교하여 보았다. 송전선로의 지상고 결정에 중요한 요소인 지표면 전계강도와 인체영향에 대한 관련성이 제기되고 있는 자계노출량 저감면에서 기존의 철제암을 이용한 경우보다 Compact형의 고분자 절연암을 적용한 경우가 더 우수하여 송전용 절연암 방식이 기존 방식보다 더 전기환경 친화

* 正會員 : 釜慶 電氣 · 制御計測工學科 博士課程

** 正會員 : 韓電 電力研究院 研究員

*** 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員

† 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 首席研究員

E-mail : dilee@kepri.re.kr

§ 正會員 : 釜慶大學校 電氣 · 制御計測工學科 教授

接受日字 : 2008年 11月 14日

最終完了 : 2008年 12月 24日

2.4 전자계량 예측 계산

2.4.1 BPA 프로그램 개요

154 kV Compact 철탑과 154 kV 수직 2회선 표준형 철탑에서의 전기환경을 비교하기 위해 BPA의 알고리즘을 사용하였다. BPA 프로그램은 미국전력회사인 BPA(Bonneville Power Administration)에서 개발해 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 전력설비 전기환경 장애검토 프로그램이다. BPA 프로그램은 Audible Noise(청정시/우천시), Radio Interference(청정시/우천시), TVI(우천시), Ozone(우천시), 지표면 전계강도, 자계 강도를 계산하는 각각의 부 프로그램으로 구성되어 있다. 이 프로그램을 통해 송전선로의 철탑형상, 도체 규격, 선로배열 및 해석 대상의 배치도등을 고려하여 송전선로로부터 거리에 따른 전기 및 자계의 최대 발생량을 계산할 수 있다[7].

2.4.2 전자계량 예측 계산 가정

송전선로에 의한 지표면 전자계강도 계산은 도체의 이도, 철탑의 접근, 평평하지 못한 지표면 등으로 인해 매우 복잡하기 때문에 다음의 가정 하에 계산을 수행한다

- 전하밀도는 공간 어느 곳에서나 시간에 따라 변화하지 않는다.
- 도체는 원통모양으로 지표면과 무한 평행하며 등전위 표면을 가진다.
- 지면은 무한한 수평면 도체평면이고, 전위는 영전위로 한다.
- 도체표면 전하분포는 균일하다고 가정하고, 도체표면에 분포한 전하를 모의하기 위해 도체 중심에 선전하를 배치한다.
- 도체의 지지물과 부근의 물체에 대한 영향은 무시한다
- 각 도체의 지상 높이의 평균치는 $H - \frac{2}{3}S$ 로 한다. 여기서 H는 도체의 지지점에서 지상 높이이고, S는 연간 평균온도에 해당하는 도체이도이다.
- 전자계 강도는 최저지상고를 기준으로 각각 지상으로부터 1 m지점의 값을 측정한다.

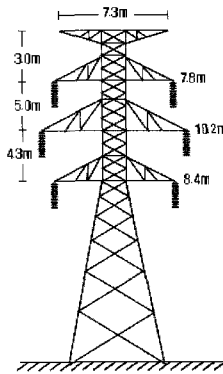
2.4.3 계산을 위한 조건

계산을 위한 비교대상 철탑으로 그림 1~그림 3에서와 같이 154 kV 수직 2회선 표준형 철탑, 기존 Compact 철탑, Diamond형 Compact 철탑 모델을 선정하였다. 다음과 같은 공통 조건하에서 해석 대상 철탑 각각의 상도체 배치를 적용하여 지표면 근방의 전기 강도와 자계 강도를 계산하였다.

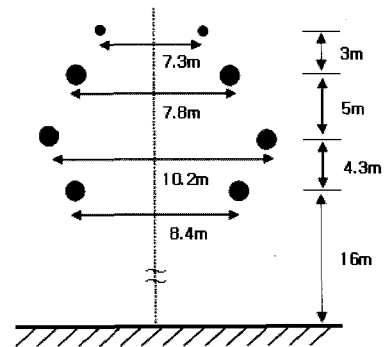
- 선간전압: 154 kV
- 지상고: 16 m
- 부하전류: 약 417.5 A[154 kV 410 mm² 전선(1B) 허용전류의 50 %]
- 전력선
 - 공칭단면적 : 410 mm²
 - 전선직경: 28.5 mm
- 가공지선
 - 공칭단면적 : 97 mm²
 - 전선직경 : 16 mm
- 상배치 : 역상배열(low reactance arrangement)

가. 154 kV 2회선 표준형 철탑형

한국에서 일반적으로 사용하는 154 kV 수직 2회선 철탑형으로 전선과 애자의 지지를 위해 철탑을 사용한다. 전선과 철탑과의 전기적 절연거리는 너써지, 개폐써지, 상용주파과전압등의 절연설계 검토를 거쳐 애자런의 애자수에 의해 결정한다. 그림 2와 같이 하부상과 중간상과는 4.3 m, 중간상과 상부상은 5.0 m, 그리고 전기가 충전되지 않은 최상부 가공지선 압과 상부상과는 3.0 m의 절연거리를 유지하도록 정하여 사용하고 있다. 또한, 바람에 의한 진동으로 상간 혼축을 방지하기 위해서 중간상의 압길이와 상부 및 하부상의 압길이 차이가 나도록 설계되어 있다[오프셋(off set)] [8].



(a) 154kV 표준형 철탑 외형도



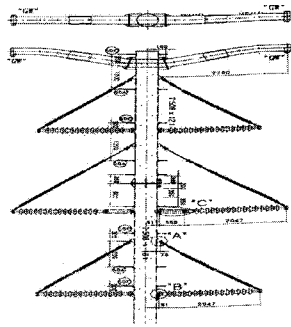
(b) 등가 단면도

그림 2 154 kV 표준형 철탑 및 도체 배치

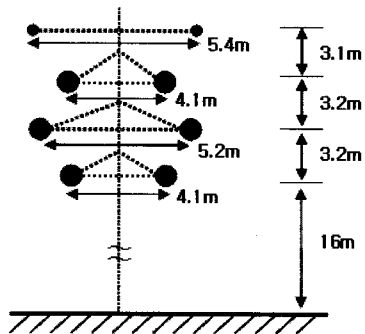
Fig. 2 Conductors arrangement of 154 kV standard type tower

나. 기존 Compact 철탑형

현재 미국, 캐나다, 호주, 스위스등에서 경과지 확보의 어려움등으로 선로소형화를 위해 사용 중인 암절연물 송전 철탑이다. 암절연물로 철탑을 대신하였기 때문에 전선도체와 철탑간의 절연성능을 향상시켜 시공 및 유지관리 비용뿐만 아니라 경과지 확보 및 전기환경면에서도 기존철탑에 비해 우수한 장점을 가지고 있다. Compact 철탑은 암절연물이 애자의 역할을 대신하기 때문에 그림 3과 같이 애자런을 생략하여 절연간격을 줄일 수 있다[9].



(a) 154kV 기존 Compact 철탑 외형도



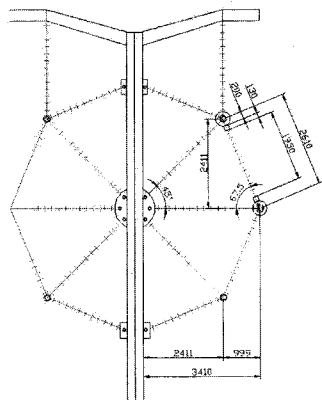
(b) 등가 단면도

그림 3 기존 Compact 철탑 및 도체 배치

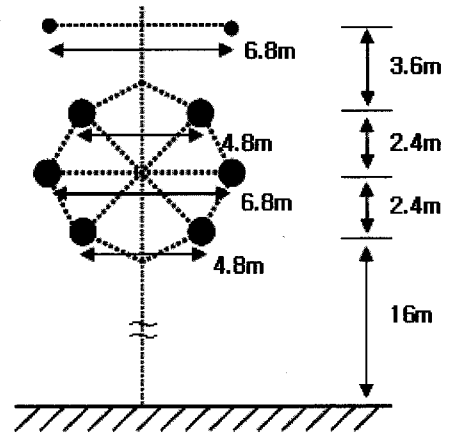
Fig. 3 Conductors arrangement of conventional compact tower

다. Diamond Compact 철탑형

Diamond형 Compact은 기존 Compact 철탑보다 더 Compact하고 안정적인 구조를 갖도록 수평선간거리, 수직선간거리, offset 등을 계산하여 설계한 Compact 철탑이다. 그림 4에서와 같이 Diamond Compact 철탑은 기존 Compact 철탑보다 전선을 지지하는 절연암을 보강하였고 가공지선 압으로부터 인장강도가 우수한 폴리머 현수애자를 설치하여 아래의 애자들을 지지하도록 설계하였다.



(a) 154kV Diamond Compact 철탑 외형도



(b) 등가 단면도

그림 4 Diamond형 Compact 철탑의 도체 배치

Fig. 4 Conductors arrangement of Diamond type compact tower

2.5 전기환경 예측 결과 비교

2.5.1 지표면 전계 강도

위 세 가지 경우에 대해 BPA 전기환경계산 Program을 이용하여 계산한 송전선로 중심으로부터 지표면 직각방향 100m까지의 거리감쇠특성은 그림 5, 그리고 송전선로 지표면 최대강도 비교는 표 3에서와 같다. Diamond형 Compact 철탑과 기존 Compact 철탑의 전계량 최대치는 같은 지상고 조건(16 m)에서 각각 0.197 kV/m와 0.243 kV/m로 기존에 설치된 154 kV 표준형 철탑의 최대치 0.379 kV/m의 52 %와 64 % 정도로 각각 감소하였다. 한편, Diamond형 Compact 철탑이 기존 Compact 철탑보다도 지표면 전계강도면에서 약 81 %로 낮아져 전계 강도면에서 더 우수한 것으로 확인할 수 있었다. 이렇게 낮아진 이유는 기존 Compact형 철탑의 경우 154kV 표준형 철탑의 상배치와 비교할 때 상간 도체가 서로 가까워졌고 다이아몬드 형 철탑의 경우는 기존 Compact 철탑보다 원주상에 있는 6상의 도체가 원형 대칭적인 구조에 더 가까워 상간의 전계 감쇄효과가 증가하였기 때문이다. 송전선로 전계와 자계 발생이 적어지도록 하는 최적상의 배치는 2회선 송전선로에서 양쪽상의 상배치가 역상배열(low reactance arrangement)상태에서 상도체간의 간격을 가깝게 하고 도체를 원형 대칭구조로 배치하는 것이다[10]. 한편, 현재 운전 중인 상용선로 중에서 최저지상고가 4.9 m로 지표면 근방의 전계강도와 자계노출이 높은 154 kV 신송T/L 구간에 대하여 위와 동일하게 각각의 Compact 철탑과 비교 계산해 보았다. 154 kV 신송 T/L, Diamond형 Compact 철탑 및 기존 Compact 철탑의 지표면 전계 강도 특성은 그림 6과 표 4에 나타내었다. 154 kV 신송T/L의 경우는 계산결과 지표면 근방의 전계 노출량이 4.029 kV/m로 전기설비기술기준 3.5 kV/m(사람 출입이 빈번한 지역 적용)을 넘어섰다. 이 경우에 같은 최저지상고 4.9 m 조건에서 두 Compact 철탑의 경우 전자계 노출량을 계산했을 때는 두 경우 모두 3 kV/m 이하로 감소하여 전기설비기술기준치를 만족함을 확인할 수 있다.

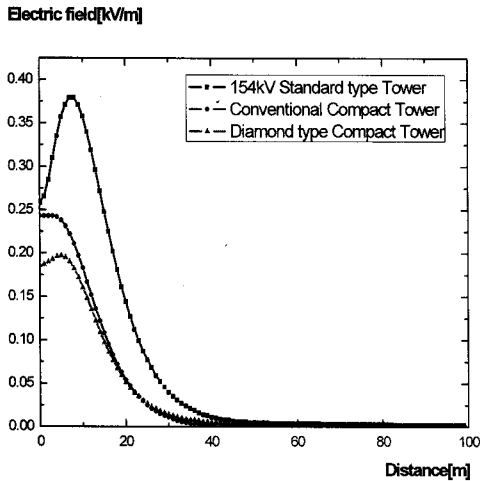


그림 5 154 kV 표준형 철탑에 대한 전계 강도 결과 비교
Fig. 5 E-field Result of 154 kV standard type tower

표 3 154 kV 표준철탑에 대한 지표면 전계값 비교
Table 3 E-field comparison of 154 kV standard type tower with the others

철탑 유형	지표면 전계강도 최대치(kV/m)	154 kV 표준철탑 기준 비교(%)
Diamond형 Compact 철탑	0.197	52
기존 Compact 철탑	0.243	64
154 kV 표준철탑	0.379	100

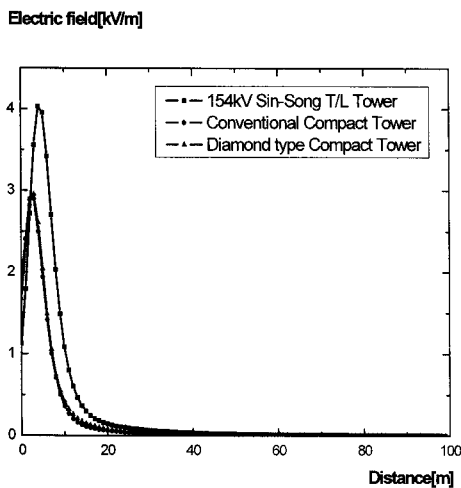


그림 6 154 kV 신송T/L에 대한 전계 강도 결과 비교
Fig. 6 E-field Result of 154 kV Sin-Song T/L

표 4 154 kV 신송T/L에 대한 지표면 전계강도값 비교
Table 4 M-field comparison of 154 kV Sin-Song T/L with the others

철탑 유형	지표면 전계강도 최대치(kV/m)	154 kV 신송T/L 기준 비교(%)
Diamond형 Compact 철탑	2.955	73
기존 Compact 철탑	2.900	72
154 kV 신송T/L	4.029	100

2.5.2 자계 강도

자계의 경우는 그림 7에서와 같이 지상고 16 m에서 Diamond형 Compact 철탑과 기존 Compact 철탑의 경우 최대 자계발생량이 각각 6.051 mG와 6.103 mG로 계산되었고 기존에 설치된 154 kV 현수철탑의 자계량 15.063 mG와 비교할 때 현저한 차이를 보여주었다. Diamond형 Compact 철탑과 기존 Compact 철탑은 표 5에서와 같이 154kV 표준형 철탑보다 40~41 % 수준으로 감소하였고 두 Compact 철탑의 경우는 자계 방출량이 비슷함을 보여주고 있다. 또한, 앞 절에서 검토한 바와 같이 154 kV 신송T/L 자계노출 특성 분석 결과는 그림 8과 표 6에 나타내었다. 계산 결과, 두 Compact 철탑의 경우는 154 kV 신송T/L의 자계 노출량보다 대략 80 % 수준으로 감소함을 확인할 수 있었다.

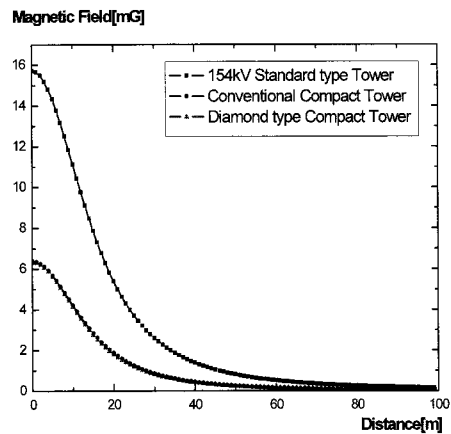


그림 7 154 kV 표준형 철탑에 대한 자계 강도 계산 결과
Fig. 7 M-field Result of 154 kV standard type tower

표 5 154 kV 표준철탑에 대한 지표면 자계량 비교
Table 5 M-field comparison of 154 kV standard type tower with the others

철탑 유형	자계강도 최대치(mG)	154 kV 표준철탑 기준 비교(%)
Diamond형 Compact 철탑	6.051	40
기존 Compact 철탑	6.103	41
154 kV 표준철탑	15.063	100

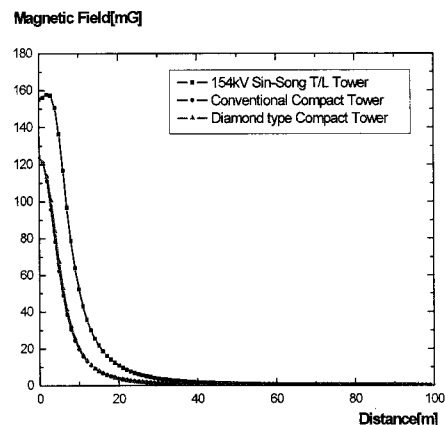


그림 8 154 kV 신송T/L에 대한 자계 강도 결과 비교
Fig. 8 M-field Result of 154 kV Sin-Song T/L

표 6 154 kV 신송T/L에 대한 지표면 자계량 비교
 Table 6 E-field comparison of 154 kV Sin-Song T/L with the others

철탑 유형	자계강도 최대치(mG)	154 kV 신송T/L 기준 비교(%)
Diamond형 Compact 철탑	122.996	78
기존 Compact 철탑	124.300	79
154 kV 신송T/L	157.705	100

3. 결 론

현재 전력수요는 지속적으로 증가하여 송전설비 건설이 불가피한 상황이지만 인근 대도시 부근에 설치되는 송전철탑이 환경적인면에서 민원의 대상이 되고 있어 새로운 대안이 요구되고 있는 시점에 있다. 이러한 배경의 일환으로 절연암을 이용한 Compact 철탑을 개발하였고 이에 대한 전기환경특성을 분석하여 보았다. 해외에서 새롭게 개발되어 운영 중에 있는 기존 Compact 철탑과 절연암을 보다 강화한 Diamond형 Compact 철탑의 지표면 전자계 노출량을 계산하기 위해 비교 대상으로 154 kV 표준형 철탑과 현재 운전 중인 철탑 중에서 지상고가 가장 낮은 154 kV 신송T/L을 선정하였다. 계산 결과, 기존에 운영중인 154 kV 표준형 철탑에 비하여 Compact형 철탑이 전자계 노출량 저감 효과면에서 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 국내에서 처음으로 폴리머 절연암을 사용하여 Compact화에 성공한 Diamond형 Compact 철탑의 경우 지표면 근방의 전기계 노출량 저감면에서 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 향후 전기환경의 기준에 대한 요구가 갈수록 높아져감에 따라 절연암을 사용한 소형 경량화된 Compact 철탑이 송전선 경과지 확보난 극복뿐만 아니라 전기환경 친화적인 송전설비 구축면에서도 해결방안이 될 것으로 기대된다. 앞으로 Compact 철탑의 전기환경에 대한 현장실증시험을 진행하여 모의계산 결과와의 비교를 통해 Compact 철탑의 전자계 저감특성을 상세히 분석하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] D. Dumora, D. Feldman, M. Gaudry, "Mechanical behavior of flexurally stressed composite insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 5, No. 2, pp. 1066-1073, April, 1990.
 [2] M. Otsubo, Y. Shimono, T. Hikami, C. Honda, "Influence of the Humidity on Leakage Current under Accelerated Aging of Polymer Insulating Materials", Conference of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, 1996.
 [3] CEA Purchasion Specification LWIWG-01(91), "Dead-end/Suspension Composite Insulator for Overhead Distribution Lines".
 [4] 이동일 "전력설비의 전기환경장해와 대책기술 개발", 2000. 5.

[5] "154 kV 송전철탑용 폴리머 절연암 개발" 보고서, 한국전력공사, 2007. 10.
 [6] D. E. Broadbent, M. H. P. Broadbent, J. Male and M. R. L. Jones, "Health of workers exposed to electric fields", British Journal of Industrial Medicine, 42, 75-84(1985).
 [7] "차기 초고압 송전연구를 위한 Corona Cage 설계" 보고서, 한전전력연구원, 1985. 4.
 [8] 한국전력공사 송전분야 설계기준-1031 "직접접지방식 송변전설비 절연협조 기준"
 [9] K. Izumi, T. Takahashi, T. Taniguchi, H. Homma, T. Kuroyagi, "Performance of line post type polymer insulation arm for 154 kV", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 25-29, 1997.
 [10] "송전선로 전자계 영향 연구" 보고서, 한전전력연구원, 1999. 5

저 자 소 개



송 홍 준 (宋 洪 俊)

1947년 11월 1일생. 1971년 동아대학교 경영학과(학사)졸업. 2004년 동아대학교 대학원 제어정보학(공학석사)졸업. 현재 부경대학교 대학원 제어계측학과(박사과정재학). 현재 (주)티와이테크 대표이사
 Tel : 051-831-3661,
 E-mail : ty0271@naver.com



이 원 교 (李 源 敎)

1975년 11월 17일생. 2002년 시립인천대 전기공학과 졸업(학사). 2004년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한국전력공사 한전전력연구원 선임보안연구원
 Tel : 042)865-5855
 E-mail : leewonkyol@kepco.co.kr



이 상 윤 (李 相 潤)

1979년 1월 24일생. 2004년 부산대학교 물리학과 졸업(학사). 2006년 서울대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사). 현재 한국전력공사 한전전력연구원 일반연구원
 Tel : 042)865-5859
 E-mail : jljpl@kepco.co.kr



최인혁 (崔仁赫)

1963년 4월 13일생. 1986년 성균관대학교 전기과 졸업(학사). 1989년 성균관대학교 대학원 전기과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전력공사 한전전력연구원 책임연구원

Tel : 042)865-5851

E-mail : idhyuk@kepri.re.kr



이동일 (李東一)

1996년 8월 : 한양대 공대 대학원 전기공학과(공학박사)

2002년~현재 : CIGRE B2(Overhead Transmission) 한국대표

1984년~현재 : KIEE 중신회원 및 평의원

(2007-2010) IEEE Member

1984년 10월~현재 : 한전전력연구원 전력계통연구소 처장(수석연구원)

[주 관심분야] 송전기술 및 전기환경분야

Tel : 042)865-5850

E-mail : dilee@kepri.re.kr



변기식 (邊基植)

1957년 7월 5일생. 1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

1990년 미국 위치타주립대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 부경대학교 전기제어공학부 교수

Tel : 051)629-6327

E-mail : gsbyun@pknu.ac.kr