

## 지중 배전계통 적용을 위한 광복합 케이블 실시간 감시시스템 개선

(An Improvement of Optical Fiber Composite Power Cable On-Line Monitoring System for Underground Distribution Network)

조진태\* · 김주용 · 이학주 · 박중성

(Jin-Tae Cho · Ju-Yong Kim · Hak-Ju Lee · Jung-Sung Park)

### Abstract

Since power system is switching to smart grid, on-line monitoring technology has become necessary for underground distribution power cable. Therefore, the application of DTS(Distributed Temperature Sensing) technology using OFCPC(Optical Fiber Composite Power Cable) capable of monitoring underground distribution power cables has been developed. These can bring about reductions in faults and increases in operating capacity of underground distribution system. To date, the test-bed of optical fiber composite power cable on-line monitoring system has been constructed. Then, matters to be improved have been drawn through verification experiments. This paper presents the improvement and experiment results of the optical fiber composite power cable on-line monitoring system to apply to underground distribution lines in the field.

Key Words : Optical Fiber Composite Power Cable, DTS, On-line Monitoring, Splice, Optical Switch

### 1. 서 론

에너지효율을 최적화시키는 목적의 스마트그리드가 전력계통에 진행되면서, 배전계통 역시 효율적 운영과 실시간 감시를 위한 기술들이 개발되고 있다. 하지만 현재 지중 배전계통의 고장 원인 중 높은 비율을 차지하는 지중 배전케이블에 대한 실시간 감시는 이루어지지 않고 있다. 또한 계통 운영적인 측면에서 일괄적인 기준용량 적용으로 지속적인 전력수요를 해결하기

위해서 지속적인 배전선로의 신설이 이루어지고 있으나, 설치장소 확보와 공사여건 악화 등의 문제가 점점 커지고 있다.

한편 스마트그리드 적용을 위해서는 전력계통의 통신망 구축이 전제되어야 한다. 현재 지중 배전계통은 전력망과 통신망이 별도로 구축되고 있으나, 광케이블이 내장된 전력케이블인 Optical Fiber Composite Power Cable(OFCPC)의 경우, 전력망과 통신망을 동시에 구축할 수 있고, 동시에 광케이블을 이용하여 케이블의 온도를 측정할 수 있는 Distributed Temperature Sensing(DTS) 기술을 적용할 수 있다.

이와 같은 DTS 기술을 지중 배전케이블에 적용한다면, 지중 배전케이블의 실시간 온도분포 감시를 통

\* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 스마트에너지연구소 일반연구원  
Tel : 042-865-5989, Fax : 042-865-5944  
E-mail : jintaecho@kepeco.co.kr  
접수일자 : 2012년 5월 22일  
1차심사 : 2012년 5월 30일  
심사완료 : 2012년 6월 29일

해 Hot spot 검출과 케이블 고장감지 등이 가능할 뿐만 아니라, 실시간으로 측정되는 지중 배전케이블의 온도를 통해 케이블의 실시간 허용용량 파악이 가능하여, 지중 배전계통의 고장감소와 일괄적인 기준용량으로 운영되는 배전선로 운전용량의 증대를 기대할 수 있다.

현재 지중 배전계통의 통신망 제공과 지중 배전케이블의 실시간 감시를 위해 광복합 케이블을 이용한 DTS 시스템을 지중 배전선로에 적용하는 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 지중 배전의 다양한 운전환경을 고려한 광복합 케이블 실시간 감시시스템 Test-bed를 구축하고, 실증시험을 시행하였으며, 이를 통해 현장 지중배전선로에 적용하기 위한 개선사항을 도출하였다. 본 논문에서는 현장 지중 배전계통에 적용하기 위한 광복합 케이블 실시간 감시시스템의 개선과 그에 따른 Test-bed의 실증시험을 수행하였다.

## 2. 개요

### 2.1 국내외 동향

전력케이블의 진단 및 감시 방법에는 DC 전류를 직접 측정하는 방법, DC 전류 측정을 통해 절연저항을 측정하는 방법, Tan  $\delta$ 를 측정하는 방법, low-frequency 전류를 이용하는 방법, 부분방전 (Partial Discharge; PD)을 측정하는 방법, 접지 전류를 측정하는 방법, 온도를 측정하는 방법 등이 있다[1].

현재 국내 지중 배전케이블의 경우, off-line 상태에서 절연저항 측정, 내전압 시험, 열화 시험을 통해 케이블을 진단하고 있으며, 최근에는 VLF(Very Low Frequency) 진단 장비를 도입하여 Tan  $\delta$ 와 부분방전을 측정함으로써, 케이블 진단을 시행하고 있다. 그러나 배전계통에서 운영되고 있는 지중 배전케이블에 대하여 on-line 상태에서 실시간 감시는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

전력케이블의 온도는 케이블을 감시하는 수단이며 동시에 케이블을 통해 공급할 수 있는 부하전류의 용량과 관련된 중요한 요소이다. 전력케이블의 실시간 온도 감시 방법으로는 온도 센서를 특정 지점에 설치하여 감시하는 방법과 광케이블을 활용한 기술이 발전하면서, 광케이블 내의 광섬유를 온도센서로 활용하여 온도를 측정하는 방법 등이 있다.

특히 광케이블을 온도센서로 이용할 수 있는 기술이 개발되면서, 이를 활용하여 전력케이블의 온도를 실시간으로 감시할 수 있는 시스템을 국내외적으로 구축하여 운영하고 있다. 그러나 광복합 케이블을 활용하여 지중 케이블의 고장예방을 위한 각종 감시시스템은 송전급 케이블에 주로 적용되고 있으며, 시스템 구축비용 등의 경제적 문제로 인해 배전급 케이블에 적용된 사례는 거의 없는 실정이다[2].

### 2.2 실시간 감시시스템 구성

본 연구를 통해 개발 중인 지중 배전계통에 적용할 광복합 케이블 실시간 감시시스템은 지중 배전케이블 고장을 사전에 진단하고 고장발생시 고장위치를 정확하게 파악하여 선로의 신속한 고장복구가 가능하며, 케이블 온도분포를 실시간으로 감시함으로써, 케이블 도체 온도를 추정하고, 이를 통해 실시간 허용용량을 추정할 수 있도록 개발되었다. 또한 1채널 DTS로 다수의 선로를 순차적으로 감시하여 많은 간선과 분기선로를 가진 지중 배전계통을 경제적으로 감시할 수 있도록 설계되었다. 더불어 직선접속부의 수밀 특성을 확보함으로써 침수 등의 현장 지중 배전선로 환경에 적용할 수 있도록 구성되었다.

그림 1은 광복합 케이블 실시간 감시시스템의 구성을 나타내었다. 감시시스템의 중앙장치는 배전센터에 설치되어 배전운영시스템과 연계하여 운전된다. 이와 같은 감시시스템은 온도분포 측정용 광케이블과 측정된 데이터의 저장을 위한 서버, 운용 프로그램 구동을 위한 PC 및 배전운영시스템과 연계하여 데이터를 전송할 수 있는 단말장치, 레이저 주입 선로를 결정하기 위한 경로 변경 광 스위치 그리고 케이블 직선접속부와 이동형 부분방전 측정장치, 선로가 분기되는 지상개폐기에서 광선로의 분기에 사용되는 광 스위치를 포함한 광 분기함으로 구성된다[3].

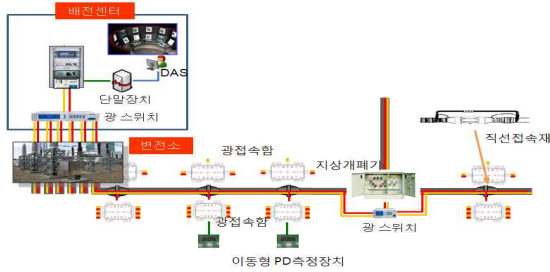


그림 1. 광복합 케이블 실시간 감시시스템 구성(3)  
Fig. 1. Configuration of OFCPC on-line monitoring system(3)

### 3. 실시간 감시시스템 개선

#### 3.1 Test-bed 구축

그림 1의 광복합 케이블 실시간 감시시스템의 기능 및 성능 시험 등의 실증시험을 위한 Test-bed를 구축하였다. 실시간 감시시스템 실증시험장의 실증시험선로는 지중 배전계통의 실제 선로환경과 동일한 구조로 약 1[km]의 지중선로로 구성이 된다. 여기에 본 실시간 감시시스템의 지중 배전계통의 많은 간선과 분기선로에 대해 순차적 감시 여부를 확인하기 위한 다중간선 구간, 분기선로 구간을 구성하고, 더불어 케이블의 접속 및 맨홀 환경을 모의할 수 있는 맨홀 구간을 설계하였다. 또한 실제 배전계통처럼 실증시험선로의 전압과 전류를 인가할 수 있도록, 시험용 옥외 50[kV], 100[kVA] 전압원과 3,000[A], 660[kVA] 전류원을 연결하도록 설계하였다.



그림 2. 실시간 감시시스템 실증시험장  
Fig. 2. Test-bed of OFCPC on-line monitoring system

이와 같이 설계된 광복합 케이블 실시간 감시시스템 실증시험장을 그림 2에서 보는 것과 같이 구축하였다. 구축된 실증시험장은 지중 배전계통 모의시험을 위한 옥외 실증시험선로와 실증시험선로에 대해 실시간 감시시스템의 운영 및 모니터링을 위한 중앙장치로 구성된다. 이와 같이 구성된 실시간 감시시스템을 통해 기본 특성시험을 완료하였다[3].

#### 3.2 직선접속부 개선

광복합 케이블 실시간감시시스템의 현장 지중 배전계통의 적용을 위해서는 지중 배전케이블을 대체하여 포설하는 광복합 케이블의 직선접속부의 현장 적용성이 중요하다. 그림 3에서 보는 것과 같이 현장 맨홀 내의 지중 배전케이블의 직선접속 시공과 환경을 검토한 결과, 실증시험장의 직선접속부의 경우, 광케이블을 접속하기 위한 광 접속함 등으로 인해 현장에 시공하기 어려워 개선이 필요한 것으로 검토되었다.

현장 적용을 위한 직선접속부의 개선은 직선접속 구간이 많은 지중 배전계통에서 시공의 편의성과 경제성을 확보해야 하기에 지중 배전케이블의 직선접속재를 광복합 케이블의 전력케이블 접속에 그대로 사용하면서, 광케이블의 접속과 수밀 문제를 해결할 수 있는 직선접속부로 개선되어야 하며, 직선접속재 감시기능과 고장시 통신케이블의 안전성을 확보할 수 있어야 한다.

이와 같은 요건을 충족하도록 다양한 검토를 시행한 결과, 광복합 케이블 내의 광케이블 구성과 실증시험을 바탕으로 현장 지중 배전선로에 적용하기 위한 개선된 실시간 감시시스템의 직선접속부를 그림 4와 같이 설계하였다.

그림 4에서 보는 것과 같이 설계된 직선접속부는 우선 광복합 케이블의 전력케이블 접속부분을 기존케이블의 직선접속재 그대로 사용하여 접속하게 된다. 또한 광복합 케이블 내의 광케이블을 포함한 Stainless steel tube는 케이블 위에 설치된 광 접속함으로 연결된다. 광 접속함 내부에서 광복합 케이블 내의 광케이블 중 DTS 측정용 광 코어는 DTS 측정용 광 코어 끼리 통신용 광 코어는 통신용 광 코어 끼리 모아서 각

각의 flexible type의 광케이블과 접속하여 연결한다. 그림 4에서 보는 것과 같이 DTS 측정용 flexible type의 광케이블은 직선접속재를 휘감아 고장 비율이 높은 직선접속재를 감시하게 되고, 통신용 flexible type의 광케이블은 중성선을 따라 설치함으로써, 직선접속재 고장시 안전성을 확보하게 된다. 이와 같은 DTS 측정용, 통신용 flexible type의 광케이블은 다음 광 접속함에서 접속해야 할 광복합 케이블의 광케이블과 연결하게 된다.



그림 3. 맨홀 내 지중 배전케이블 직선접속  
Fig. 3. Splice of distribution power cable in Manhole

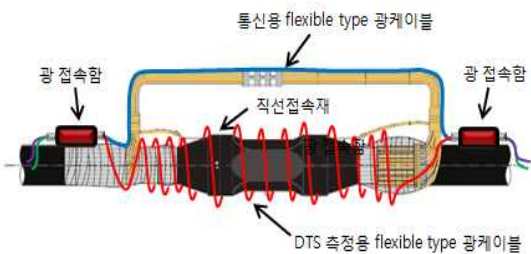


그림 4. 개선된 직선접속부 구조  
Fig. 4. Structure of improved splice

이와 같이 개선된 직선접속부는 직선접속재를 그대로 사용함으로써, 전계 등의 고려를 하지 않아도 되고, 현재 지중 배전케이블의 직선접속 시공을 그대로 유지하면서 광 접속을 위한 광복합 케이블의 절단 등의 추가 시공을 최소화하게 된다. 또한 광케이블 연결을 위한 광 접속함을 케이블 위에 설치함으로써, 현재 시공 환경에서 설치 공간을 확보할 수 있게 된다. 또한 개선된 직선접속부의 수밀처리는 기존의 직선접속재의 수밀처리와 동일하여 시공의 편의성과 수밀특성을

확보할 수 있게 하였다. 참고로 직선접속부의 광 접속함은 지중 배전선로의 지상기기 내부의 접속과 중단 접속에서 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있어 광복합 케이블의 지상기기 내부와 중단 접속을 위한 추가적인 개발이 필요하지 않게 된다.

### 3.3 광 분기함 개선

광복합 케이블 실시간 감시시스템을 지중 배전계통에 적용할 경우 많은 접속과 분기선로가 존재함에 따라 광복합 케이블 내 광케이블로 레이저펄스를 전달하는 과정에서 많은 손실이 발생할 것으로 예상된다. 이와 같이 광 손실 발생량이 증가할 경우 본 연구에서 개발한 실시간 감시시스템의 현장 적용 공장이 제한될 수 있다. 이것은 표 1에서 보는 것과 같이 DTS 성능을 나타내기 위해서는 DTS 전체 손실이 일정 손실 이하를 유지해야 하기 때문이다.

실증시험장에서 운영 중인 실증시험선로의 DTS 광 손실을 그림 5에서 보는 것과 같이 측정하여, 전체 시스템의 손실 원인을 살펴본 결과, 광케이블, 광 접속함, 광 분기함 및 시공 과정에서 발생한 손실로 나타났다. 광케이블에서 나타나는 손실의 경우, 광케이블 자체 손실인 0.7[db/km]이고, 광 접속함 손실의 경우, 평균 0.042[db]로 전체 손실에 매우 작은 영향을 주는 것으로 나타났으며, 광 분기함의 경우, 평균 0.6[db] 정도가 나타났으며, 시공과정에서 발생한 손실의 경우, 재시공을 통해 해결할 수 있었다.

실시간 감시시스템의 적용 공장을 확대하기 위해서는 광케이블과 광 분기함의 손실을 개선하여야 하는데, 광케이블의 손실은 광케이블을 통과하는 광 에너지가 거리에 따라 작아지는 것을 의미하는 광케이블 자체의 특성이라 할 수 있다. 그러므로 DTS에서 사용되는 1,060[nm]의 주파수 대역의 광원에 대해서 약 0.7[db/km] 정도의 광케이블 손실은 불가피하게 발생할 것으로 보인다. 따라서 시스템의 적용 공장을 확대하기 위해 광 분기함을 개선하는 것이 효과적이다.

실증시험장에 설치된 광 분기함의 내부 구성 요소를 살펴보면, 광케이블이 인입되어 광 분기함 내의 광 스위치로 연결되고 광 스위치 내에서 광이 전달될 경로

를 결정한 후 광 커넥터를 통해 분기회로로 연결된다. 그리고 이들의 제어를 위한 메인보드, 광 스위치 제어 보드 및 전원부와 통신보드로 구성된다. 이 중에서 광 손실이 발생하는 부분은 광케이블, 광 커넥터, 광 스위치로 볼 수 있다. 여기서 광분기함 구성요소별 손실 영향 인자로는 광 커넥터와 어댑터 부분에서의 접속에 의한 손실, 광 스위치를 통해 분기회로로 전달되면서 발생하는 손실로 볼 수 있다.

표 1. 실시간 감시시스템 성능(3)  
Table 1. Performance of DTS(3)

Description	Specifications
Temperature accuracy	±1.0[°C]
Temperature resolution	1.0[°C]
Measurement time	30[초]
Sampling resolution	1[m]
Spatial resolution	1.5[m]

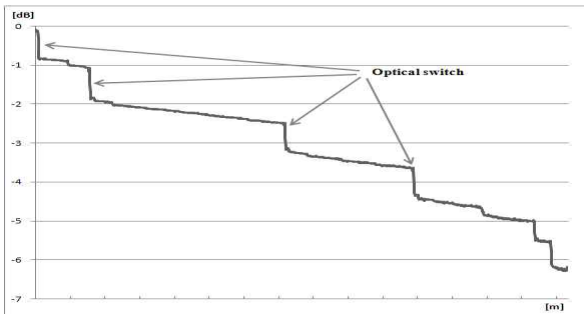


그림 5. 실증시험선로 DTS 광 손실  
Fig. 5. Structure of improved splice



그림 6. 개선한 광 분기함  
Fig. 6. Improved optical switch

따라서 광 분기함의 광 커넥터와 어댑터 접속을 용착접속으로 변경하고, 광 스위치를 DTS용 광원 출력에 최적화하여 광 손실을 최소화 하도록 개선하여 그림 6에서 보는 것과 같이 제작하였다.

#### 4. 시 험

현장 지중 배전계통의 적용을 위해 개선한 광복합 케이블 실시간 감시시스템을 광복합 케이블 실시간 감시시스템 Test-bed를 통해 실증시험을 시행하였다.

먼저 개선한 직선접속부에 대해서는 그림 7에서 보는 것과 같이 IEC 60794-1-2 기준에 따라 단락시험을 시행하였다[4]. 이는 지락고장으로 중성선에 지락전류가 발생하였을 때, 광케이블과 직선접속부 그리고 광 접속함의 신뢰성을 확인하기 위한 것이다. 0.3[s]동안 10[kA]의 전류를 3번 인가하는 단락시험 동안, DTS를 통해 통신 상태와 손실을 측정할 결과 이상이 발생하지 않았다. 또한 침수 시험을 통해 직선접속부의 수밀 특성을 확인하였다. 이와 같은 직선접속부를 그림 8에서 보는 것과 같이 실증시험장에 설치하였다.

한편 개선한 광 분기함은 실험실에서 DTS 광 손실 시험을 시행한 결과, 평균 0.36[db]로 0.4[db] 이하의 손실을 나타내어, 기존의 실증시험장에 설치된 광 분기함의 0.6[db] 보다 개선된 결과를 나타냈다. 이와 같이 개선 제작한 광 분기함을 실증시험장에 분기선로를 모의하기 위해 설치한 기존의 광 분기함을 대체하여 설치하였다.



그림 7. 직선접속부 단락시험 구성  
Fig. 7. Set-up of the short-circuit test for splice





그림 8. 직선접속부 실증시험장 설치  
Fig. 8. Installation of splice in test-bed

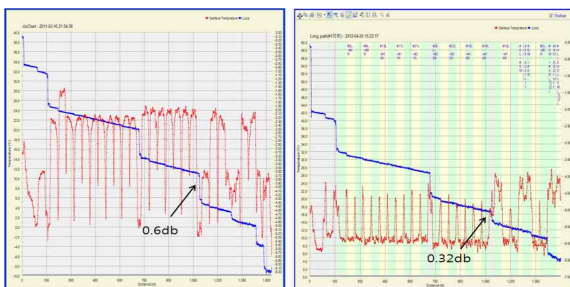


그림 9. 광 분기함의 개선 전·후 광 손실 측정  
Fig. 9. Measurement of optical loss for optical switch



그림 10. 실시간 감시시스템 실증시험  
Fig. 10. Verification experiment of on-line monitoring system

실증시험선로에 개선된 직선접속부와 광 분기함을 설치하고 광복합 케이블 실시간 감시시스템 실증시험을 시행하였다. 중앙장치와의 연동시험을 통해 광 분기함은 그림 9에서 보는 것과 같이 기존의 광 분기함과 교체 설치한 부분의 DTS 광 손실이 0.32[db]로 기존의 0.6[db] 보다 개선된 결과를 실증시험에도 확인할 수 있었다. 또한 분기선로에 대한 순차적 감시 기

능이 정상적으로 이루어짐을 확인하였으며, 직선접속부도 그림 10에서 보는 것과 같이 직선접속재 감시 등의 기능이 정상적으로 운영되고, 광 손실 문제도 없음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 개발 중인 광복합 케이블 실시간 감시시스템의 현장 지중 배전계통 적용을 위하여 시스템 개선을 시행하고, Test-bed를 통한 실증시험을 수행하였다. 기존의 직선접속부를 개선하여 시공의 편의성과 경제성을 확보하고 동시에 직선접속재 감시 기능 및 고장시 통신케이블 안정성을 확보하였다. 또한 광 분기함의 개선을 통해 DTS 광 손실을 줄여 실시간 감시시스템 적용 공장을 확대할 수 있도록 하였다.

이와 같은 실시간 감시시스템의 개선은 현장 지중배전선로에 본 시스템의 적용을 가능하게 하여 지중 배전계통의 고장감소와 운전용량 증대를 가져올 것이다. 또한 이를 통해 효율적이고 안정적인 계통 운영을 가능하게 할 것이다. 향후 추가 검토 및 개선을 통해 본 연구의 광복합 케이블 실시간 감시시스템을 실제 현장의 지중 배전계통에 적용할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

## References

- [1] G. Yonggang, and W. Wei, "The research on XLPE cable insulation based on ground current method on-line monitoring technique", Jicable '11, International Conference on Insulated Power Cables, 2011.
- [2] J. Downes, and H.Y. Leung, "Distributed Temperature Sensing Worldwide Power Circuit Monitoring Applications", Int. Conf. Power Syst. Technol., Vol. 2, pp. 1804-1809, 2004.
- [3] J. Cho, J. Kim, and H. Lee, "A Development and Performance Assessment of On-line Monitoring for Optical Fiber Composite Underground Distribution Network

using DTS”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.25, No.6, pp. 115-121, 2011.

- [4] “Optical Fiber cables - Part 1-2: Generic specifications - Basic optical cable test procedures.”, Int. Std., IEC 60794-1-2, 2003.

◇ 저자소개 ◇



**조진태 (趙眞兌)**

1979년 11월 1일생. 2006년 고려대 전기 전자전파공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 스마트에너지연구소 일반연구원.



**김주용 (金周勇)**

1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 스마트에너지연구소 책임연구원.



**이학주 (李鶴周)**

1965년 12월 23일생. 1989년 충남대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 전력연구원 스마트에너지연구소 선임연구원.



**박중성 (朴重城)**

1978년 4월 17일생. 2004년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006~2010년 효성중공업 연구소 연구원. 현재 한국전력공사 전력연구원 스마트에너지연구소 일반연구원.