

DTS를 활용한 광복합 지중 배전계통 실시간 감시시스템 개발 및 성능평가

(A Development and Performance Assessment of On-Line Monitoring System for Optical Fiber Composite Underground Distribution Network using DTS)

조진태* · 김주용 · 이학주 · 조휘창 · 최명호

(Jin-Tae Cho · Ju-Yong Kim · Hak-Ju Lee · Hwi-Chang Cho · Myeong-Ho Choi)

Abstract

Intelligent distribution equipment is inevitable to realize self-healing which is one of smart grid functions in distribution network. Therefore, most of distribution equipment have been developed with self diagnostic sensors. However, it is not effective to construct on-line monitoring system for underground distribution cable because of high cost and low sensitivity. Recently, optical fiber composite cable is being considered for communication and power delivery in order to cope with increasing communication in distribution network. This paper presents the design and performance assessment results of underground cable on-line monitoring system using DTS(Distributed Temperature Sensing) and optical fiber composite underground cable.

Key Words : DTS, Optical Fiber Composite Power Cable, On-Line Monitoring, Smart Grid, Self-Healing

1. 서 론

스마트그리드 구현을 위해 배전계통에서 광통신의 사용이 증가하면서 전력회사의 통신비용도 지속적으로 증가하고 있다. 최근에는 이를 해소하기 위해 전력망에서 광복합 케이블(Optical Fiber Composite Power Cable; OFCPC)의 사용이 증가하고 있으며, 배전계통으로의 확대가 검토되고 있다. 광복합 케이블

을 사용할 경우, 별도의 통신망 구축 없이 전력통신이 가능하지만, 전력선 고장시 통신 불능 상태가 될 가능성이 있기 때문에 이를 사전에 예방할 수 있는 감시시스템이 필수적이다. 또한 통신망으로 사용되는 광복합 케이블의 감시시스템은 발생된 고장이 확대되지 않도록 초기에 고장을 검출 할 수 있도록 설계되어야 하며, 광복합 케이블과 접속제도 고장발생시 통신 불능 최소화 될 수 있는 구조로 설계되어야 한다. 더불어 많은 간선과 분기선로를 가진 복잡한 지중 배전계통 전체를 감시할 수 있으면서 경제적인 시스템이 되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 지중 배전계통에서 전력전송과 통신이 동시에 가능한 케이블 구조를 제시하고 이를 활용한 케이블 감시시스템을 설계하였다.

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소
Tel : 042-865-5989, Fax : 042-865-5944
E-mail : jintaecho@kepco.co.kr
접수일자 : 2011년 4월 20일
1차심사 : 2011년 4월 23일
심사완료 : 2011년 5월 16일

지중케이블에 광케이블이 포함될 경우 이를 센서로 사용하여 케이블의 온도를 감시할 수 있는 DTS (Distributed temperature sensing system)를 적용할 수 있다. DTS는 송전 케이블의 온도 감시를 위해 폭 넓게 적용되고 있는 기술이지만 배전선로와 같이 복잡한 선로에 적용하기에는 시스템 구축비용이 고가이고 해결해야 할 문제가 많다. 본 논문은 광케이블을 이용한 DTS를 배전계통에 적합하도록 개선하고 이를 배전자동화 시스템과 연계할 수 있는 시스템을 제안하고 실제 계통 환경을 모의할 수 있는 실증시험선로를 구성하고 기본 특성시험을 수행하였다.

2. DTS 개요

분포온도 측정시스템(DTS)은 그림 1과 같이 레이저 펄스를 분포온도센서 케이블에 입사시킨 후, 되돌아오는 후방 산란광의 시간을 분석하여 거리를 측정하고, 후방 산란광 중 온도의존성이 있는 라만산란광만을 광학 필터로 분리하여 이를 수광부를 통해 광의 세기를 측정/분석하여 온도를 측정하는 시스템으로써, 평균화 처리를 통하여 그 정확성을 확보한다[1].

일반적으로 라만산란광은 분포온도센서 케이블의 손실을 측정 분석하는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)에서 사용되는 Rayleigh 파장 대역의 후방 산란광에 비하여 그 세기가 수천분의 일 정도로 미약하므로, 장거리 구간에서 산란되는 광이 다시 펄스 입사부로 되돌아올 때에는 분포온도센서 케이블의 손실 특성에 따라 온도 정확성이 크게 좌우된다.

따라서 분포온도 측정시스템의 성능지표는 장비 내부의 광학부의 특성(Signal level)과 분포온도센서 케이블의 특성으로 구분되며, 두 가지 특성이 종합되어 온도 측정 정확도(Temperature accuracy), 온도 측정 편차(Temperature resolution), 측정 시간(Measurement time), 온도 데이터 최소 표시 간격(Sampling resolution), 온도 변화 감지 구간(Spatial resolution) 등이 성능을 나타내게 된다. 아래 표 1에 본 연구에서 사용한 분포온도 측정 시스템의 성능 지표를 나타냈다.

3. 실시간 감시시스템 개발

3.1 광복합 지중배전케이블 구조

본 연구에서 사용한 광복합 지중배전 케이블의 구조는 그림 2와 같다. 스테인레스 튜브속에 4가닥의 광케이블 삽입하고 이것을 중성선 사이에 배치한 구조이다. 2개의 스테인레스 튜브를 사용한 것은 케이블 고장발생시에도 통신불능 상태를 방지하기 위한 것이다.

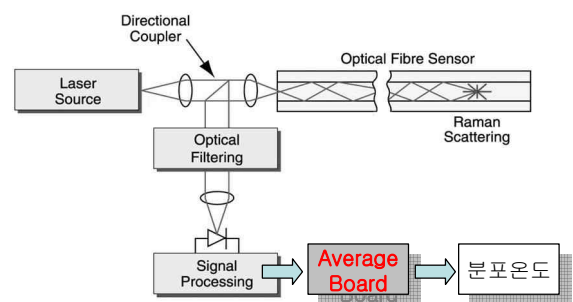


그림 1. 분포온도 측정 시스템의 원리

Fig. 1. Principle of DTS

표 1. 분포온도 측정 시스템의 성능 지표

Table 1. Performance of DTS

구분	의미	규격
Laser	Max. average output power	17[mW]
Sensing cable	Optical Loss	1dB@1036[nm]
Measurement	Temperature accuracy	±1.0[°C]
	Temperature resolution	1.0[°C]
	Measurement time	30초
	Sampling resolution	1[m]
	Spatial resolution	1.5[m]

본 연구에서는 배전계통에서 가장 많이 사용되고 있는 TR-CNCV 325[mm] 케이블에 광케이블을 삽입하였다. 2개 중 1개의 스테인레스 튜브 속에 포함된 광케이블이 DTS 시스템과 연결되어 온도측정용으로 사용되고 나머지 광케이블은 통신망으로 사용된다. 이 케이블은 기존 CNCV 케이블과 동일한 구조를 가지면

서 2개의 스테인레스 튜브를 추가로 삽입한 형태이므로 케이블 자체의 성능에는 변화가 없다[2].

3.2 배전용 DTS 시스템 설계

지중 배전케이블 실시간 감시시스템이 가져야할 주요 기능은 고저항 지락고장을 포함한 케이블 고장을 사전에 진단하는 것과 고장발생시 고장위치를 정확히 파악하는 것이다. 이를 통해 선로의 신속한 고장복구가 가능하도록 하고, 고저항 지락고장시 변전소 차단기(Circuit Breaker)의 재투입을 방지할 수 있게 된다. 더불어 측정된 광케이블 온도를 통해 케이블 도체온도를 추정함으로써, 케이블의 실시간 허용용량 산정이 가능하여 배선선로 이용률을 증대할 수 있다.

그림 3은 배전용 실시간 감시 시스템의 구성을 나타낸다. 그림 3에서 보는 것과 같이 DTS시스템의 중앙장치는 배전센터에 설치되며 배전자동화 시스템과 연계하여 운전된다. 이와 같은 감시시스템은 온도분포 측정용 광케이블과 측정된 데이터의 저장을 위한 서버, 운용 프로그램 구동을 위한 PC 및 배전계통 운영 시스템과 연계하여 데이터를 전송할 수 있는 단말장치, 그리고 레이저 주입 선로를 결정하기 위한 경로 변경 광 스위치 그리고 케이블의 직선 접속재 부분에서의 광접속합과 이동형 부분방전 측정장치, 선로가 분기되는 지상개폐기에서 광선로의 분기에 사용되는 경로변경 광 스위치로 구성된다.

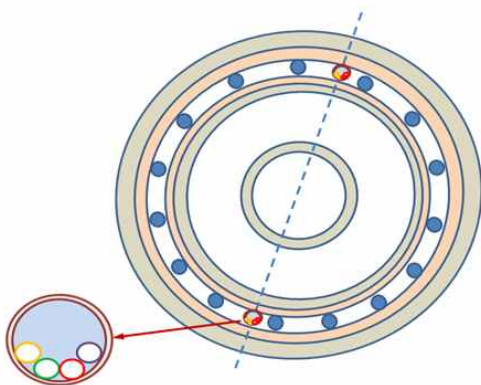


그림 2. 광복합 케이블 단면
Fig. 2. Cross-section of OFCPC

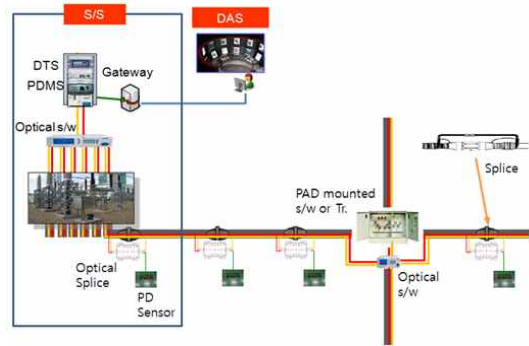


그림 3. 배전용 DTS 시스템 구성
Fig. 3. Configuration of DTS system for distribution

앞에서 언급한 것과 같이 지중 배전계통은 많은 간선과 분기선로를 가지므로 모든 선로를 동시에 실시간 감시하는 것은 과다 비용 발생으로 효율적이지 못하므로 경로 변경 광 스위치를 이용하며 1채널 DTS로 다수의 선로를 순차적으로 감시할 수 있도록 설계하였다.

3.3 접속재 및 분기선로 광접속부 설계

현재 지중 배전계통은 선로를 구성하기 위해 케이블을 직선접속재로 연결하고 있다. 그러나 이와 같이 케이블 연결에 필요한 접속재는 지중 배전선로 고장의 높은 비율을 차지하고 있다. 따라서 광복합 케이블을 활용한 지중 배전선로 구성시에 접속부분의 감시와 고장 발생시 통신망 확보가 가능한 접속방법에 대한 검토가 필요하다.

본 연구의 실시간 감시시스템은 고장발생 빈도가 높은 접속재의 열화상태를 감시할 수 있는 부분방전 측정장치의 연계가 가능한 구조로 설계될 필요가 있다. 하지만 부분방전 측정 장치를 상시 연계하는 구조로 시스템을 구축할 경우, 고가인 부분방전 측정장치를 인해 구축비용이 지나치게 높을 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 고장이 많이 발생하는 여름철이나 열화가 예상되는 특정 개소에 대해 부분방전 측정장치를 연결하여 필요한 일정기간 동안 상태를 감시할 수 있는 구조로 설계하였다.

앞에서 언급한 것과 같이 지중선로 고장의 높은 비

을 차지하는 접속재 부분에 대해서 접속재에서 고장이 발생할 경우에도 통신용으로 사용되는 광케이블이 보호될 수 있는 구조로 설계가 고려되어야 하며, 추가적으로 DTS 기능 구현에 필수적인 외부온도 측정을 위해 별도의 센서나 광케이블을 구비하지 않고도 직선접속재 부분의 광 접속부분에서 외부온도를 측정할 수 있도록 구성될 필요가 있다.

그림 4에서 보는 것과 같이 케이블 내에 설치된 두 개의 스테인레스 튜브는 각각 광 접속함을 통해 유연한 광케이블로 연결되어, 접속재의 각각 다른 경로로 설치된다. 하나는 접속재 표면과 중성선을 따라서 설치함으로써 접속재의 온도 분포와 중성선의 온도 분포를 측정할 수 있다. 중성선의 온도 분포 측정은 외부온도를 측정하는 용도로 사용하고자 한다. 그리고 다른 하나의 다음 광복합 케이블의 스테인레스 튜브와 연결되어 통신선로로 활용된다. 이와 같이 광케이블이 포함된 두 개의 스테인레스 튜브를 다른 경로를 따라 설치함으로써 접속재 부분의 고장이 발생하여 DTS용 광케이블이 손상되더라도 통신용 광케이블을 보호할 수 있게 된다.

한편 지중 배전계통은 많은 분기선로를 가지고 있기 때문에 경제적인 감시시스템 구축할 필요성이 있다. 따라서 최소한의 DTS 채널로 분기선로까지 감시 가능하도록 구성하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 지중 배전선로가 분기되는 지상개폐기나 지상변압기 부분에 설치할 수 있으면서 DTS 경로를 변경할 수 있는 광 경로 변경 스위치를 그림 5와 같이 설계하였다.

3.4 운영프로그램 개발

지중케이블은 간선과 분기선을 포함하여 많은 케이블이 존재하기 때문에 단순한 순차적인 모니터링 방법으로는 효과적으로 고장예방을 수행할 수 없다. 이에 따라 본 연구에서는 배전케이블에 적합한 운영 프로그램을 그림 6과 같이 설계하였다. 시스템 운전자는 대상선로의 스캔 방법을 자동 또는 수동으로 설정할 수 있으며, 자동모드에서는 지중선로의 고장이력과 설치년도 등을 고려한 지중선로 구간별 신뢰도 계산 결과를 바탕으로 감시주기를 자동 설정한다.

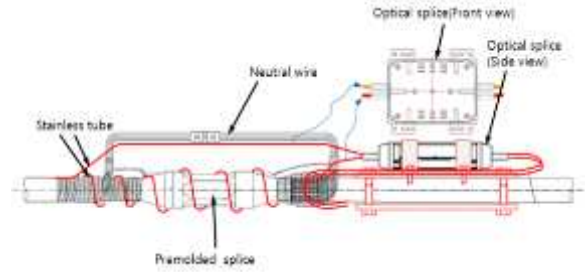


그림 4. 접속부분 구조
Fig. 4. Structure of splice

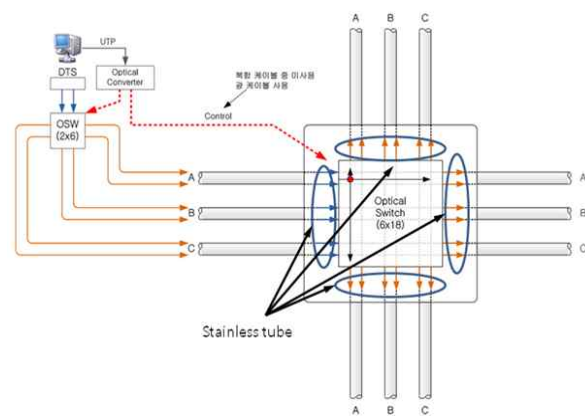


그림 5. 지상기 설치용 광 스위치 구조
Fig. 5. Structure of optical switch at PAD mounted equipment

이후 지정된 간격으로 모든 선로를 순차적으로 자동 감시하고 이 과정 중에 측정온도나 온도변화폭이 설정치를 초과하거나 부하전류가 급격히 증가하는 등 정밀 진단기준을 초과하는 상황이 발생하면 이벤트 신호를 발생하고 배전센터의 배전 자동화시스템에 해당선로의 운전현황에 대한 실시간 정보를 표시한다. 이후 조작자 확인으로 경보상황이 해제되면 초기 상태로 복귀한다.

수동모드에서는 조작자가 직접 감시대상 선로를 선정하고 지정된 구간만 감시한다. 그리고 감시 중 진단 기준과 비교하여 이를 초과하는 상황이 발생하면 이벤트를 발생하고 배전자동화시스템 사용자 화면상에 해당구간의 상황을 표시하고 조작자가 해당구간의 경보상황을 처리한 후에는 초기상태로 복귀한다. 또 배전자동화 시스템에서 특정 지중선로의 부하전류가 급

증하여 과부하 상태가 될 경우 이벤트 신호를 발생하고 DTS는 자동으로 현재 진행 중인 선로 감시를 중단하고 해당선로의 온도분포를 측정하고 실시간 허용용량 계산 프로그램을 구동하여 배전자동화 시스템에 해당선로의 실제 허용용량을 표시한다. 그리고 시스템 운전 중 지중선로 고장이 발생할 경우 해당 선로의 고장위치를 파악하고 배전자동화 시스템의 고장위치를 사용자 화면에 표시한다.

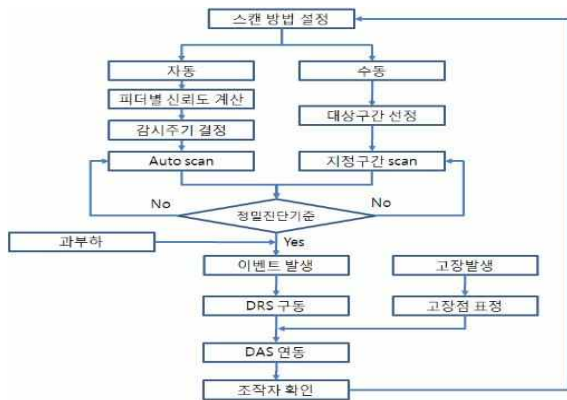


그림 6. 운영프로그램 알고리즘
Fig. 6. Algorithm of management program

4. 기본특성 시험

4.1 단락시험

광복합 케이블을 활용한 케이블의 실시간 감시 및 통신망 구축을 위해선 현재 지중 배전계통의 전력 케이블을 대신하여 광복합 케이블 포설시 지중 배전계통의 지락고장 등의 고장에 대하여 광케이블의 신뢰성이 확보되어야 한다. 따라서 광복합 케이블에 내장된 광케이블의 신뢰성 확인을 위해 광섬유케이블 시험 절차인 IEC 60794-1-2 기준에[3] 따라 광복합 케이블의 단락시험을 시행하였다.

광복합 케이블 10[m]에 대하여 그림 7에서 보는 것과 같이 단락시험을 구성하였다. 10초의 측정시간으로 지속적으로 DTS를 통해 통신 상태 및 손실을 측정하는 상태에서, 단락전류 시험기를 통해 10[kA] 전류를 0.3[s] 동안 케이블 도체와 중성선에 각각 3회 인가

하였다. 그 결과 통신 이상은 발생하지 않았으며, 그림 8에서 보는 것과 같이 시험 전·후에 통신 손실 변화는 거의 발생하지 않았다. 따라서 지중 배전계통에 광복합 케이블 적용 시 지중 선로고장에 대해서 광케이블의 신뢰성을 확보 할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 실증시험선로 구성 및 연동시험

앞에서 언급한 각 구성부분의 설계에 맞추어 제작한 실시간 감시시스템의 기본성능을 평가하기 위해 실제 선로 환경과 동일한 구조로 그림 9와 같이 약 1[km] 길이의 지중선로를 구성하였다. 본 실증시험선로는 3개의 인출선로와 2개의 분기선로 및 맨홀로 구성되어 있으며, 3,000[A], 660[kVA] 전류원을 통해 선로에 전류를 공급할 수 있도록 구성하였다.



그림 7. 광복합 케이블 단락시험 구성
Fig. 7. Set-up of the short-circuit test for OFCPC

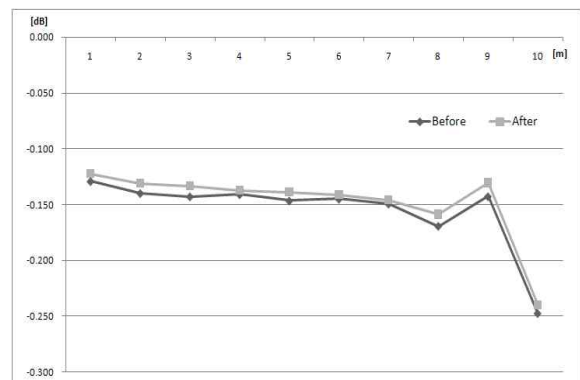


그림 8. 단락시험 전·후 손실
Fig. 8. Graph of the difference in the optical loss

4.3.1 통신손실 특성시험

1개 채널로 다중 간선과 분기선로를 감시하기 위해서는 여러 개의 광 스위치가 필요하다. 더불어 지중 배전선로의 직선 접속 부분에서 실시간 감시를 위한 광 접속이 필요하다. 본 논문에서는 제작된 광 접속함과 광 스위치를 실증시험선로에 설치하고, 이를 통해 실시간 감시 시스템의 통신손실 특성시험을 수행하였다.

그림 10에서 보는 것과 같이 실증시험선로의 통신손실을 측정할 결과, 25개의 광 접속함 부분의 손실은 0.1[dB] 이하이며, 4개의 광 스위치 부분의 손실은 약 0.6[B]였다. 한편 전체 시스템의 통신손실은 약 6.2[dB] 정도로 나타났다. 이와 같은 통신손실 결과를 통해 실증시험선로의 실시간 감시시스템은 정확한 케이블 온도 측정이 가능함을 알 수 있다. 하지만 실증시험선로 보다 선로가 길고, 분기선로가 많은 실제 지중 배전계통에 적용하기 위해선 향후 전체 손실의 약 40[%] 정도를 차지하는 광 스위치의 통신 손실을 개선해야 할 것이다.

4.3.2 기능시험

그림 9와 같이 구성된 실증시험선로 실시간 감시시스템에 대한 기능시험을 시행하였다. 그림 11은 본 시스템의 메인 화면으로서, 이를 통해 선로에 포설된 광복합 케이블의 온도 감시를 수행하게 된다. 우선 3개의 인출선로와 2개의 분기선로에 대한 순차적 온도감시 시험을 시행하였다. Heat gun을 이용하여 다중 간선 부분과 분기선로 부분의 온도 감시 여부를 확인한 결과, 정상적으로 각 선로에 대한 순차적 감시가 이루어짐을 확인하였다. 다음으로 설계된 직선 접속부의 구조에 맞추어 직선접속재와 중성선 온도 측정 가능 여부를 확인하였고, 이후 맨홀을 침수시켜 광 접속함을 포함한 직선접속 부분의 수밀성을 확인하였다. 마지막으로 광복합 케이블에 물리적 외력 및 단선으로 인한 통신 손실 변화를 확인하였고, 더불어 단선시에는 신속한 Alarm 발생을 확인하였다. 이와 같은 기능은 현장에서 지중 케이블 외상 고장 등의 케이블 단선 고장시 신속한 고장점 위치를 제공할 수 있을 것이다.

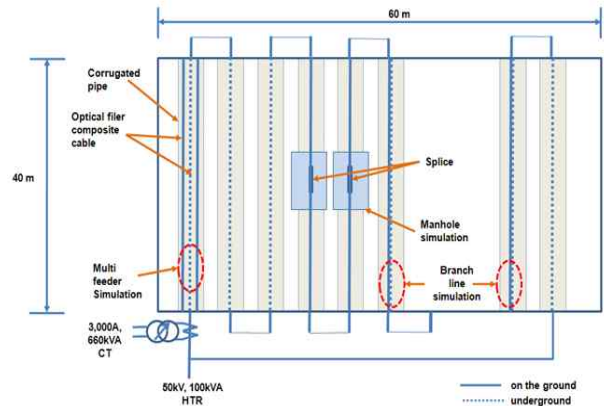


그림 9. 실시간 감시시스템 실증시험선로 구성
Fig. 9. Test-bed configuration for the DTS system

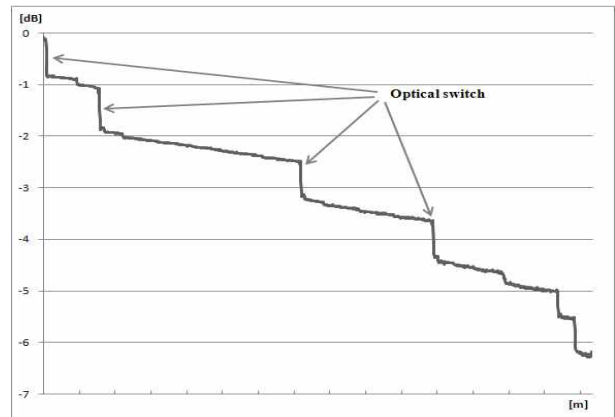


그림 10. 통신 손실 특성 시험
Fig. 10. Graph of the optical loss test

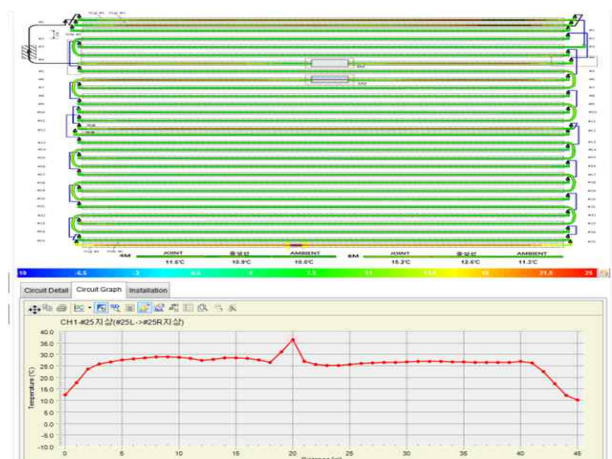


그림 11. 실시간 감시시스템 메인 화면
Fig. 11. Main viewer of the DTS system

5. 결 론

본 논문에서는 DTS를 이용하여 지중 배전선로에 적합한 온라인 케이블 감시시스템을 개발하고 기본성능시험을 수행하였다. 광복합 케이블, 접속재, 광접속부, 운영 프로그램 등의 실시간 감시시스템의 각 구성부분을 지중 배전계통을 고려하여 설계하고 제작하였다. 본 시스템의 기본성능 시험을 위해 실증시험선로를 구축하였다. 1채널의 DTS를 사용하여 다중 간선과 분기선로를 순차적으로 모니터링 할 수 있었고, 접속부의 온도를 측정할 수 있었고, 침수시험을 통해 접속부의 수밀성을 확인할 수 있었다. 또한 케이블의 물리적 외력 인가 및 단선상황을 모의하여 케이블 단선고장에 고장점 위치 확인을 할 수 있었다.

이와 같은 실시간 감시시스템을 배전자동화 시스템과 연계할 경우 기존의 지능형 배전기기와 함께 선로상태를 실시간으로 감시 가능하여 배전계통의 고장에 측과 복구시간 단축이 가능할 것이다. 또한 광복합 지중 케이블을 이용한 통신망의 안정적인 운영을 가능하게 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

References

- [1] J. Downes, H.Y. Leung, "Distributed Temperature Sensing Worldwide Power Circuit Monitoring Applications", Int. Conf. Power Syst. Technol., Vol. 2, pp. 1804-1809, 2004.
- [2] J. Downes, H.Y. Leung, "New design of Optical Fibre Unit(OFU) for Incorporation in Power Cables for Distributed Temperature Sensing(DTS) and On Line Monitoring", Int. Conf. Power Syst. Technol., Vol. 2, pp. 1998-2001, 2004.
- [3] "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 전기전자전과공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소 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 송배전연구소 선임연구원.



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 송배전연구소 선임연구원.



조휘창(金周勇)

1982년 8월 6일생. 2008년 충남대 전기공학 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소 위촉연구원.



최명호(崔明鎬)

1965년 6월 28일생. 2004년 한밭대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 아산지점 전력공급팀장.