

LED 교통신호등의 고장 사례 분석

이문호* · 주윤석* · 김종원* · 여인선**
(주)포에프* · 전남대학교 전기공학과**

Failure mode analysis of LED traffic signals

Moon-Ho Lee* · Yoon-Seok Joo* · Jong-Won Kim* · In-Seon Yeo**
POEF Co., Ltd.* · Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University**

Abstract - 이 논문은 현재 국내에 설치된 LED교통신호등 중 고장이 발생한 다수의 시료를 채취하여 고장사태를 정리하고, 사례별로 고장원인을 분석하였다. 특히 신호등의 성능을 좌우하고 실질적인 고장의 원인을 제공하는 전원장치의 고장에 대하여 고장유형별로 구동방식을 비교, 분석함과 동시에 고장부분별 원인분석 및 평가를 통하여 LED교통신호등의 고장을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

1. 서 론

LED 교통신호등은 기존 백열전구식 신호등에 비해 90%이상의 절전을 통해 대폭적으로 에너지를 절약함과 동시에 10배 이상의 긴 수명으로 유지 보수비용을 절감할 뿐만 아니라, 시인성 향상에 따른 교통사고 감소 등의 장점을 가지고 있다.

2002년 LED교통신호등 규격제정 후 급속히 교체가 진행, 2005년 말 기준 국내 보급률은 약 35%에 달한다. 현재 LED교통신호등은 고효율에너지저장재로 지정되어 보급되고 있으며, 국내 50여개 인증업체가 생산 및 판매를 하고 있다. 한때 100여개 이상의 업체가 난립하여 지나친 경쟁으로 인한 가격하락으로 품질저하의 원인이 되기도 하였으며, 대부분의 업체가 소규모로 체계화된 생산이나 품질관리 면에서 상대적으로 열악한 환경에서 생산을 하고 있어서, 이 또한 저품질의 LED신호등 보급이 염려되고 있는 실정이다.

이러한 원인들로 인해, 최근 기 설치된 신호등모듈에서 다양한 유형의 고장이 발생하여 사회적 문제를 야기하기도 하였으며, 초기에 보급할 당시의 LED교통신호등의 큰 장점으로 부각되었던 긴 수명에 대한 보장이 유명무실하게 되었다.

이에 이 논문에서는 현재 국내에 설치된 LED교통신호등 중 고장이 발생한 다수의 시료를 채취하여 고장사태를 파악하고, 사례별 고장원인을 분석·평가하였다. 또한 고장유형별로 LED모듈 및 전원장치의 구동방식을 비교·분석함과 동시에 고장부분별로 원인분석 및 평가를 통하여 LED교통신호등의 고장을 최소화 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고장 사례

최근 발생하고 있는 LED교통신호등의 빈번한 고장발생에 대한 사례분석을 위하여 현장에 설치되어 있는 제품 중 고장이 발생한 다수의 신호등모듈을 시료로 채취하였다. 고장빈도가 높은 원형 차량등(적색, 황색, 녹색)을 대상으로 하였으며, 신호등모듈의 고장에 대한 명확한 기준이 없는 관계로, 외관상 일정 개수 이상의 LED소자가 국부적으로 소등되었거나 완전히 소등된 모듈, 또는 신호등 발광면의 광출력 감소가 확인한 등기구에 대해서 고장으로 단정하여 분석시료로 선정하였다.

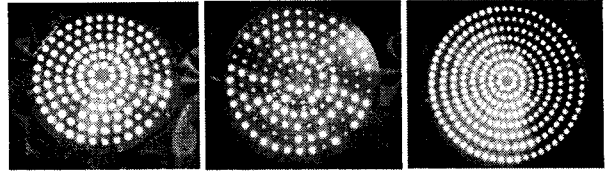
그 결과, 신호등모듈의 색상별로, 또는 유형별로 다양한 형태의 고장이 발생함을 알 수 있었다. 신호등의 색상별로는 적색, 황색, 적색신호등의 순으로 고장율이 높았는데, 이는 녹색신호등용 LED소자의 경우 다른 색상의 LED에 비해 정전기에 취약하고, 약한 내압특성 등이 주된 원인이었다.

또한, 고장유형별로는 모듈기판에 실장된 LED의 국부적인 소등과 완전소등, 그리고 플리커현상, 광출력감소 등으로 크게 분류할 수 있다.

LED의 국부소등현상의 경우, 극히 적은 수의 LED불량까지 고장으로 단정한다면 가장 많은 고장빈도를 차지하는 유형으로 분류할 수 있으나, 대부분의 경우 운전자가 인지하지 못하는 경우가 대부분이며, 고장의 원인 또한 제조공정상의 삽입불량, 실납으로 인한 부품의 Short, Soldering 과정에서의 냉납 등 제품의 품질관리 미흡으로 인해 발생하는 고장으로 볼 수 있다.

그리고 신호등의 완전소등, 플리커현상, 광출력감소 등 교통신호등에서 발생하는 대부분의 고장이 LED소자가 아닌 전원장치에 의해 발생하는 고장으로서, 특히 광출력의 감소가 심한 경우나, 신호등이 완전히 소등되는 경우는 심각한 교통 혼란을 야기하거나 교통사고를 유발할 수 있으므로 신중히 검토되어야 할 것이다.

<그림 1>은 LED신호등 모듈의 일반적인 고장사태를 나타낸 것이다.



<그림 1> LED교통신호등 모듈의 고장사례

<표 1> LED교통신호등 고장유형 분류

고장유형	색상기준내용	고장원인	고장비 [%]	고장의 심각성
LED 국부소등	녹색신호등에서 주로 발생	LED소자 및 제조공정	40	小
LED 완전소등	색상구분 없이 발생	전원장치	35	大
광출력감소	황색신호등에서 주로 발생	전원장치	15	大
플리커 현상	황색신호등에서 주로 발생	전원장치	5	中
모듈의 얼룩짐	녹색신호등에서 주로 발생	LED정격전압	5	小

주: 위의 DATA는 현장에서 채취된 40 EA의 고장시료를 유형별로 정리한 값임.

<표 1>에서 알 수 있듯이, 고장유형별로 원인을 분류하면 LED소자에 의한 고장과 전원장치에 의한 고장으로 크게 나눌 수 있었으며, 실질적인 고장의 원인이 되는 요소는 전원장치임을 알 수 있었다.

2.2 LED교통신호등 전원장치

LED교통신호등의 성능을 좌우하는 핵심구성요소이면서, 실질적인 고장의 원인을 제공하는 전원장치의 경우, 국내 규격을 만족시키기 위하여 제조회사별로 다양한 구동방식의 SMPS(Switch Mode Power Supply)를 채용하고 있었다. 기존의 범용 SMPS와는 달리 신호등의 경우 상대적으로 부하용량이 낮으면서 90%이상의 고역률 회로를 필요로 하고 있으므로, 구동회로의 설계 시 이 점을 중요시해야 한다.

실제 고장시료들의 전원장치를 분석한 결과 신호등에 적용되고 있는 SMPS는 크게 4가지 방식으로 요약할 수 있다.

- PFC+PWM 조합한 Dual Stage 방식
- PFC IC와 Power FET 소자를 이용한 비절연 Single Stage 방식
- Simple Off-Line DC/DC Switcher를 이용한 방식
- 범용 PFC를 이용한 절연방식의 Flyback SMPS

첫째, PFC+PWM 조합한 Dual Stage 방식은 1차단에 능동역률보정회로(PFC회로)가 들어가고 2차단에 PWM회로가 서로 조합을 이루는 회로로서, SMPS중 고압파위에 속하며 제작비용이 가장 많이 드는 방식이다. 이 방식의 경우 상당히 고압회로임에도 불구하고 PFC booster converter를 가짐으로 booting time에 의해 역률 값이 낮아지고 많은 리플이 발생하는 등의 문제가 있다. 신호등용으로는 초창기에 사용되었던 방식이다.

둘째, PFC IC와 Power FET 소자를 이용한 비절연 Single Stage 방식은 Flyback 방식이며 PFC IC를 Buck 방식으로 구동한 것이다. 트랜스포머를 기준으로 1차측은 범용 PFC회로와 같으며, 단지 2차측의 전압을 피드백하여 구동한다는 것이 차이점이라 할 수 있다. 비교적 간단한 방식이나, 1차

측과 2차측 간의 절연이 되지 않아, 낙뢰 시 전원단에 적절한 방위회로가 없을 경우 2차측에 연결되어 있는 LED모듈에 손상을 입히는 문제점이 있다.

셋째, Simple Off-Line DC/DC Switcher를 이용한 방식은 LED구동전용IC를 이용한 방식으로 전체회로의 구조가 간단하고, 스위칭회로가 아니기 때문에 전원단에 필터가 필요 없으며, 단지 전용IC와 인덕터 스위칭 소자만 있으면 구동시킬 수 있다. 또한 스위칭 회로처럼 EMI에 제약을 받지 않으며 응답속도가 굉장히 빠른 장점을 가지고 있다. 그러나 구동 IC가 고가인 관계로 신호등용으로는 활용도가 낮은 편이다.

마지막으로, 범용 PFC를 이용한 절연방식의 Flyback SMPS는 위의 두 번째 방식과 유사하지만 1, 2차간 절연이 되었으며, 고역률을 유지할 수 있다는 게 큰 차이점이라 할 수 있다. 현재 국내신호등 전원장치의 구동방식 중 활용도가 가장 높은 방식으로 파악되었다.

국내에 설치되어 사용 중인 LED교통신호등 전원장치 중 대표적인 구동방식을 살펴본다. 위의 4가지 방식중 절연, 비용, 고장발생정도 등을 종합적으로 검토해본 결과 마지막으로 소개된 범용 PFC를 이용한 절연방식의 Flyback SMPS가 가장 우수한 것으로 나타났다. 아래 <표 2>는 LED교통신호등 전원장치의 구동방식을 비교한 것이다.

<표 1> LED교통신호등 전원장치의 구동방식 비교

구동 방식	절연 유무	제작 비용	Operating Delay Time	THD	효율 [%]
PFC+PWM 조합한 Dual Stage 방식	O	High	Long	△	70-75
PFC IC와 Power FET 소자를 이용한 비절연 Single Stage 방식	×	Low	Short	O	80-85
Simple Off-Line DC/DC Switcher를 이용한 방식	×	High	Short	⊙	85-90
범용 PFC를 이용한 절연방식의 Flyback SMPS	O	Low	Short	O	80-85

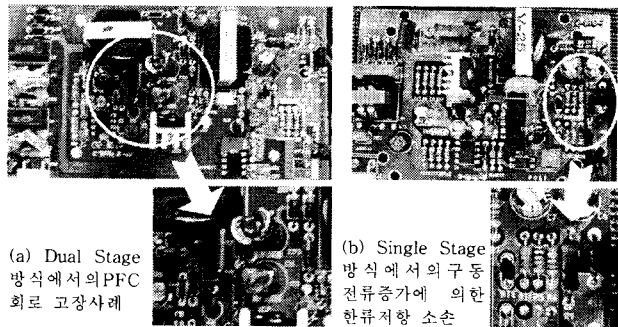
주] Operating Delay Time : LED 신호등 광도 값이 일정정도 이상(90%) 도달할 때 까지 걸리는 시간(경찰청규격 75ms 이내)

2.3 고장유형 및 고장최소화 방안

현장에서 채취한 다수의 고장제품 중 제조공정상의 불량으로 인한 고장으로 예상되는 제품들을 제외하고, 실제 현장에 설치된 후 전원장치의 고장으로 인해 소등이 되거나 플리커현상 등이 나타난 제품에 대하여 고장유형을 분석한 결과, 아래와 같은 고장유형으로 분류를 할 수 있다.

- 회로 내 파워스위치의 소손
- 트랜스포머 소손
- PFC회로내 HV 콘덴서 파괴
- 시동저항의 소손
- 2차측 한류저항의 소손

<그림 2>는 LED교통신호등 전원장치의 고장사례를 나타낸 것이다.



(a) Dual Stage 방식에서의 PFC 회로 고장사례

(b) Single Stage 방식에서의 구동 전류증가에 의한 한류저항 소손

<그림 2> LED교통신호등 전원장치의 고장사례

2.3.1 파워스위치의 소손

LED신호등 SMPS의 고장 중에 가장 많은 유형을 차지하고 있었다. 파워

스위치는 보통 POWER FET 소자를 많이 사용하고 있는데, FET를 선정하기 위해서 일반적으로 다음의 식을 사용하는데,

$$VDS_{max} = VPK_{max} + VR + DV = 373 + 100 + 70 = 543V$$

VPK_{max} : Input voltage × 1.414

VR : Reflected voltage : 70V

DV : Leakage inductance overvoltage : 100V

위 식에 근거하고 마진을 고려하면 드레인 소스간 전압이 600V이상의 것을 사용하면 된다. 하지만 계산식에는 없는 많은 변수들이 있으며, 대표적으로 트랜스포머의 누설인덕턴스파전압이 일정하지 않다는 문제점이 있었다. 즉 마진을 적게 잡을 경우, 스위칭 소자들이 소손 우려가 있음을 알 수 있었다. 특히 고온이나 극저온시 트랜스포머의 파라메타들이 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 스위칭 소자의 마진을 높게 책정해야 한다.

2.3.2 트랜스포머 소손

트랜스포머의 권선이 파괴되는 현상이며, 대부분 1차측 권선 2차측 권선이 동시에 소손되는 현상이 나타났다. 그 중 2차측이 타버리는 현상은 트랜스포머의 용량이 초과되어서 나타나는 현상이며, 상온에서는 문제가 있었지만 고온에서 동작할 때 트랜스포머의 권선 저항이 같이 증가하여 열폭주 현상이 발생하는 것으로 판명되었다. 이에 대한 대책으로는 2차측 부하의 최대값의 4배 이상의 용량으로 권선을 설계해야하고, 보통 2차측 권선은 병렬 권선 방법을 사용하여야 한다.

2.3.3 PFC회로내 HV 콘덴서 파괴

Dual Stage 방식에서만 발생하는 경우로서, 1차측의 PFC 회로에 의해서 Middle 단계는 DC 400V의 고압이 생성되며 많은 리플전류가 발생한다. PFC 단계는 과전압 방지 회로가 내장되어 있기는 하지만 초기의 Overshoot 구간일 때는 굉장히 짧은 di/dt의 전류가 발생하며, 경우에 따라서는 전해콘덴서 규격에 규정된 최대 리플전류를 초과한다. 제품의 생산과 에이징 단계에서는 불량이나 전혀 발생되지 않으며 현장에 설치하고 시간이 흘러 전해콘덴서가 노화단계에 접어들면 내부 단락과 함께 파괴되는 것으로 보인다. 이에 대한 대책으로는 전해콘덴서를 필요 용량만큼 병렬로 부착하여 리플 전류를 줄여야 할 것으로 판단되며, PFC 회로 끝단에서 나오는 DC전압보다 높은 전압의 콘덴서를 부착하거나, PFC 출력 전압 자체를 줄여서(325~350V) 콘덴서의 피로도를 줄이는 방법이 권고된다.

2.3.4 시동저항의 소손

SMPS 구동용 Smart IC의 대부분은 제품규격에 시동전압(Start Voltage 또는 Booting Voltage) 값이 명시되어 있는데, 즉 명시된 최소 DC 전압이 구동IC의 Vcc단자에 감지되어야만 동작한다.

그리고 시동저항의 역할은 브리지 다이오드를 통한 DC 전압을 구동IC 단자에 직접 전압을 공급하는 역할을 하는데 문제는 스타트 저항의 전압강하가 너무 크다는 데에 문제점이 있었다. 즉 $V_{rms} 220V \times 1.414 = 311V$ 를 DC 12V로 변환하기 위해서 최소 120KΩ의 와트급 저항이 부착되며, 이때 많은 열이 발생하면서 시간이 지나면서 소손된다. 대책으로는 69KΩ정도의 저항을 직렬 연결하여 전압강하 분담을 완화시켜야 할 것으로 판단된다.

3. 결 론

지금까지 LED교통신호등에서 발생하는 고장사례들을 알아보고, 특히 전원장치의 구동방식비교 및 전원장치에서 발생하는 고장유형별로 고장최소화 방안에 대하여 살펴보았다.

2002년 LED교통신호등의 규격 제정 후 활발한 교체가 진행되고 있지만, LED소자의 성능향상과는 반대로 업체난립과 최저가 경쟁 등으로 인한 제품의 품질에 상당한 문제가 있는 것으로 드러났다. 특히 업체마다 제품 가격경쟁력을 확보하기위해 강구한 저가 및 저품질의 LED 사용, LED수량의 감소, PCB재질의 변경, 그리고 전원장치의 보호회로 생략 등은 실제 고장 제품에서 확인할 수 있었다. 전원장치의 경우 구동회로의 간략화 및 경제적인 구동방식으로서의 기술개발도 중요하겠지만, 장시간 품질을 보증할 수 있는 안정화 전원장치의 개발이 최우선으로 고려되어야 할 것이다.

또한, LED 제품에 대한 고장분석 및 신뢰성평가를 위한 명확한 기준이 없고, 장비 및 관련 인프라 등이 부족하여 고장에 대한 분석 및 평가를 하는 데에 상당한 어려움이 있었다. 제품의 고장에 대한 근본적인 원인분석을 통해 설계기술 및 공정개선을 위해서는 관련제품에 대한 명확한 고장분석 및 신뢰성평가기준이 시급히 마련되어야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김래현 외, "고출력 LED 및 고체광원 조명기술", 도서출판 아진, 2006
- [2] 경찰청, "LED교통신호등 표준지침", 2003.11.