

전동차 실내조명의 flickering 현상에 관한 연구

Study about flickering phenomenon of interior lighting in electrical railway train

김명룡*, 김원경**, 백광선*, 이강원***
M. R. Kim, W. K. Kim, K. S. Back, K. W. Lee

Abstract

Light Flickering of the lamp(fluorescent lamp) with voltage fluctuation operates as a factor harmful to train passengers which is subjective to them. Recently, international flickering standard(IEC61000-3-3) are applied all over the world. However, there are not any study preparing for regulation about light flickering inside running train. In this study, the Flicker phenomenon is investigated from several references and also how the flickermeter is configured and defined. Flicker evaluation using it are studied.

1. 서론

전동차의 보조전원으로 사용하는 전기의 품질과 관련된 기본 parameter로서 공급주파수와 전압 level 을 들 수 있다. 전동차에서 사용하는 보조전원의 범위는 각각 $110V \pm 6V$, $220V \pm 13V$, $380 \pm 38V$ 이고, 표준주파수는 $60Hz \pm 0.5Hz$ 에서 규정되어 있으나, 전압 및 주파수는 외부 요인에 의하여 왜곡되어 본래의 전압파형과는 다른 변동파형 및 고조파를 함유하게 된다. 전압은 0.01s에서 수십초정도의 시간에 걸쳐 반복적으로 변화하거나 과도전압을 발생시키는 부하(전동기의 기동 등)에 의하여 변동하며, 주로 전압변동이 일어나는 원인으로는 가선전압의 변화, 공기압축기, 냉난방·환기장치 등 대용량 전동기의 반복적인 기동 등을 들 수 있다. 대부분의 전압변동은 광 flicker 문제를 발생시키지 않으나, 전압변동의 크기가 크고 빈번하게 발생하며, 특히 고장 level이 낮은 때 많이 발생한다. 지금까지 조사한 바에 의하면 단시간동안의 전압플리커는 진폭변조현상으로 볼 수 있으며, 이때의 변조주파수는 0.01Hz 정도에서 30Hz까지이다. 이때 전압변동에 가장 민감한 부하는 전동부하로서 전압변동이 공칭 전압의 1%이하에서도 flicker 문제를 일으킬 수 있으며, 0.3%에서 0.5%까지의 작은 전압변동도 7Hz에서 10Hz 정도의 주파수를 갖게 되면 인간의 눈에 피로감을 유발할 수 있는 수준의 flicker가 발생할 수 있다. 그러므로 전동부하의 전압변동에 대한 영향을 평가하는 것은 좋은 조명품질을 유지하기 위하여 매우 중요하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 전력품질의 저하에 의한 전압변동이 flicker에 미치는 영향을 기존 자료를 이용하여 정리하고, 국제 표준규격에서 제시된 flicker 현상에 대한 생리학적 모델을 이용한 flickermeter에 대하여 알아본 후, 이것을 이용한 flicker 평가방법 및 평가방법의 실제 적용사례를 들어 철도차량용 보조전원의 flicker에 대한 정량적인 평가방법의 적용가능성을 검토한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 비회원

2. 본론

2.1 전력변동과 flicker

전압변동(Voltage Fluctuation)이란 일련의 랜덤한 전압변화로써 그 크기는 ANSI C84.1-1982에서 규정된 변동범위인 0.9 p.u. ~ 1.1 p.u.를 벗어나지 않는 현상을 말한다. IEC 61000-3-3에서는 전압변동을 “series of changes of r.m.s voltage. evaluated as a single value for each successive half period between zero-crossings of the source voltage” 로써 정의하고 있듯이 일련의 램프 또는 연속적인 전압변화가 이에 해당한다고 할 수 있다. 기술적으로 정확히 말하자면 전압변동은 전자계현상으로 부하에 있어서 바람직하지 않은 전압변동의 결과이다. 그러나, 전압변동과 플리커는 표준규격에서 자주 연결되어 사용되고 있어, 이러한 전압변동을 전압 플리커(Voltage flicker)라는 어휘로 표현하고 있다. 그림 1은 변조주파수가 10Hz이고, 변동폭이 20V인 전압flicker 파형의 예를 보여준다.

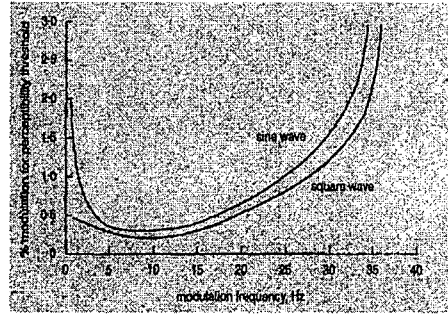
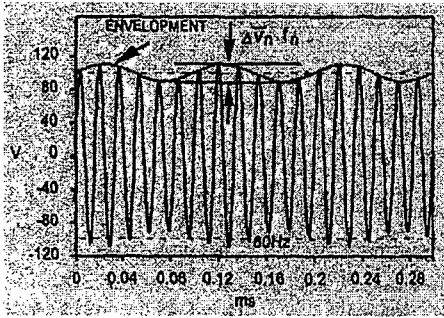


그림 1 전압플리커 파형예 ($f_1=10\text{Hz}$, $\Delta \overline{V}_1=20\text{V}$) 그림 2 두파형의 전압변동에 대한 민감도 평가

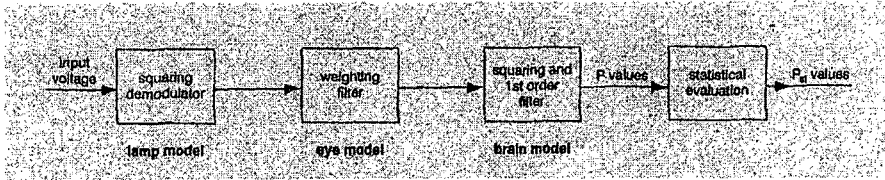
부하전류의 크기가 연속적으로 빠르게 변화하는 부하는 종종 flicker라고 불리는 전압변화현상을 유발시킬 수 있다. 여기서 flicker라는 말은 전압변동에 의해 램프의 깜박거림이 인간의 눈에 의해 감지되는 데서 유래되었으며, IEC 61000-3-3에서는 “impression of unsteadiness of visual sensation induced by a light stimulus whose luminance or spectral distribution fluctuates with time”라고 정의하고 있다. 또한 flicker란 조명의 변화에 대한 개인들의 주관적인 평가이며, 전압변동에 의한 램프에서의 조도의 변화가 결국 빛의 flickering으로서 인지되는 현상으로 설명된다. 그림 2는 두가지 전압파형의 변조주파수에 의해서 전압이 변동하는 경우 사람의 인지정도를 나타내고, 10Hz 정도에서 피크를 보여주며, 1~25Hz의 범위를 가진 전압변동하에서의 flicker에 대하여 사람이 가장 민감하게 반응한다는 것을 보여주고 있다.

인간의 눈은 flickering되는 빛의 차이에 따라 다르게 반응하며, 느린 flickering은 빠른 flickering보다 더 적게 어지러움을 유발하지만, 매우 빠른 flickering은 전혀 인지되지 않는다. 예를 들어, 60Hz에서 동작하는 정상적인 형광등이 깨끗이 보이는 것이 그 한 예이다. 60Hz 교류전압에서 동작하는 형광등은 전압의 0점을 지나는 시점에서 꺼지므로 정확히 초당 120번의 on/off를 하게 된다. 우리의 눈은 이러한 빠른 flickering을 안정된 빛으로서 인식한다. 인간의 눈이 가장 민감하게 반응하는 것은 초당 18번이며 분당 1080번의 변화이다. flicker는 전압의 빠른 변화로부터 발생하므로, flickering light로서 등을 점멸시키는 것과 같은 것으로 이해될 수 있다. Flicker의 발생원리는 배전망 임피던스가 전류부하에 반응하여 고조파를 발생시키는 것과 유사하지만, 고조파와는 대조적으로 비선형 전류에 대해서만 발생하는 것이 아니며, 반복적으로 변화하는 부하에서 발생한 대전류의 흐름때문에 일어난다. 즉, 고기동전류나 대용량 부하, 압축기와 같은 펄스성 전원의 on/off가 반복할 때이다. 또한, flicker는 발전기와 Uninterruptible power supplies(UPS)에서 전압안정화에 문제를 일으킬 수 있으며, 부하에 의한 반응외에 제어전압변화도 포함한다. 최근에 flicker는 ripple 제어신호에 의하여 일어날 수 있다.

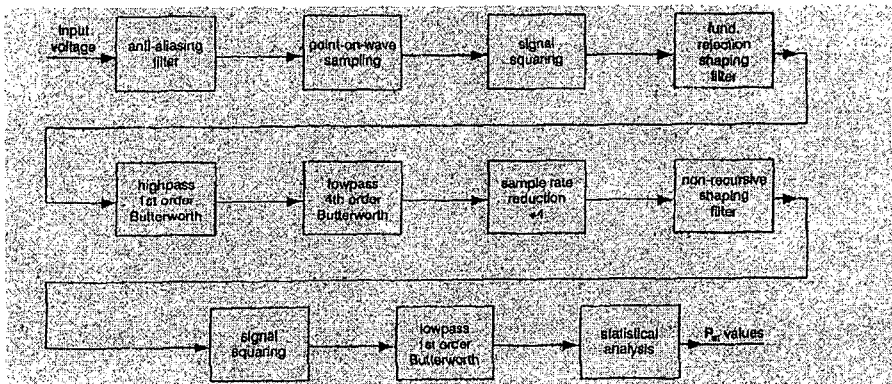
2.2 Flicker의 평가

2.2.1 Flickermeter의 구성

전압변동형태는 매우 다양하며 변동원에 따라서 스텝, ramp, 사인파 또는 랜덤한 전압변화의 혼합이 될 수도 있다. 전압변동에 대한 기준을 마련하기 위하여 부하기기에서 허용될 수 있는 범위와 변동되는 전압형태와는 무관한 최대 변동율을 정의하여야 하며, 이를 위하여 전압변동에 대한 전동, 육안 및 두뇌의 전체응답을 모델링하여 flicker를 평가하는 방법이 필요하다. 이에 따른 수학적 모델이 1980년대 초에 UIE(Union Internationale D'Elctrothermie)에 의하여 개발되었고, IEC의 기준이 되었다. 초기 UIE 모델은 아날로그 용어로 정의되었으나 인가전압의 point-on-wave 샘플링에 따른 디지털 처리를 사용하였다. 이러한 model에 대한 근사된 형태의 블록도와 상세화된 블록도를 그림 3에 나타내었다. 또한, 실제 IEC61000-3-3에서 채택된 flicker 모델의 block도는 그림 4에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 3 Flickermeter의 간이 블록도(a) 및 상세블록도(b)

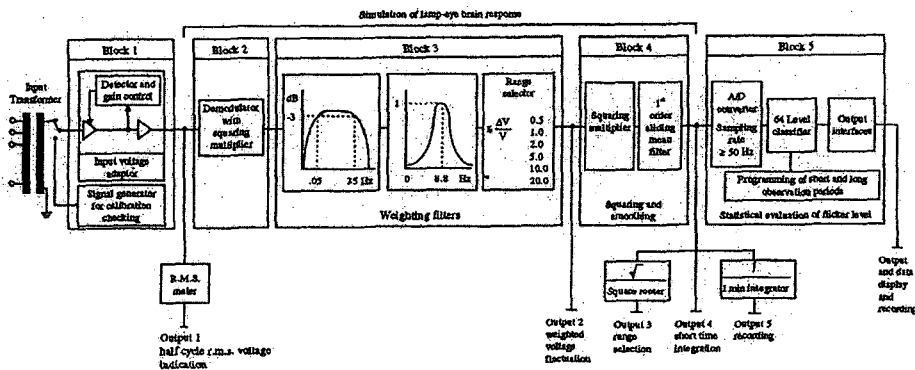


그림 4 IEC 61000-4-15 Flickermeter

2.1.1 Lamp model

인가전압의 스텝변화에 따른 광출력변화의 크기는 초기 필라멘트 온도에 따르며 지수적인 특성을 가진다. 램프의 시정수는 필라멘트 열용량에 비례하고 열손실에 반비례한다. 적은범위의 정현파 입력전압변동에 대한 램프응답은 식(1)로 주어진다.

$$\Delta J/J_R = K \cdot \Delta V/V_R (I/\sqrt{(1 + \omega_f^2 \tau^2)}) \quad (1)$$

여기서 ΔJ 는 정격광출력(J_R)에 대한 광출력변화이고, ΔV 는 정격전압 (V_R)에 대한 전압입력변화이며, 그리고 K 는 상수로서 필라멘트램프의 경우 3.6이고, τ 는 13~33ms의 범위의 램프 시정수 그리고 ω_f 는 정현파 전압변동의 주파수를 나타낸다. 램프모델은 램프에 인가하는 AC 전압을 광출력 flicker로 변환하며, 식(2)의 출력전압으로 표시된다.

$$V_0 = (V \cos \omega t (1 + m \cos \omega_f t))^2 \quad (2)$$

여기서 $V \cos \omega t$ 는 인가전압을 나타내며, $m \cos \omega_f t$ 는 전압변동을 나타낸다. 이러한 출력전압은 DC 성분과 60Hz성분 그리고 120Hz성분이 포함되게 되므로, 이러한 성분을 제거하기 위하여 0.05Hz cutting first order Butterworth highpass filter가 사용되고, 각 성분들에 비해 0.1%이하의 전압변동이 잘 측정될수 있도록 최소한 90dB까지 감쇠되어야만 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 그림 5와 같은 60Hz comb filter가 사용된다.

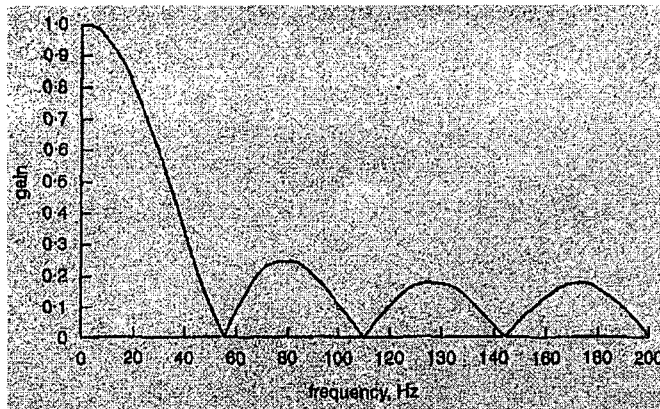


그림 5 Comb Filter

2.1.2 Eye model

눈의 주파수 민감도는 표준 weighting filter를 채택하여 모델링되었다. 표준 weighting filter는 80 항 non-recursive digital filter에 의하여 만들어지며, 식(3)는 디지털 필터의 구성을 보여준다.

$$A'_n = K_1 A_n + K_2 A_{n-1} + K_3 A_{n-2} + \dots + K_{80} A_{n-79} \quad (3)$$

여기서 A'_n 는 샘플 point n 에 대한 필터 출력이고, K_1, K_2, \dots, K_{80} 는 이득 상수 그리고 $A_n, A_{n-1}, \dots, A_{n-79}$ 는 데이터 순열을 나타낸다.

2.1.3 Brain model

Brain model에 대해서는 weighting filter에 두가지 요소를 덧붙여 표현하였다. 첫 번째가 squaring element이고 두 번째가 lowpass filter(3000ms정도의 시정수를 가진다)이며, 이때 lowpass filter는 눈으로 받은 광이 뇌에 전달되는 지연시간이라고 생각된다.

2.2 Flicker의 평가

플리커의 평가는 Flickermeter에 의해 측정되는 플리커지수(P)를 통하여 이루어지며, 인간의 눈이 flicker에 민감한 정도를 나타낸다. 플리커지수는 관찰시간에 따라서 P_{st} (단기 플리커지수)와 P_h (장기 플리커지수)로 나누어진다. 이때 관찰시간은 P_{st} 와 P_h 각각 10분과 120분(2시간)이며, 관찰시간 10분은 단시간 동작하는 개별적 전압변동원의 관찰에 적당하며, 관찰시간 120분은 간헐적으로 부하가 변동되거나, 몇 개의 부하가 집합적으로 변동되는 경우를 관찰하는 경우에 적당하다. 이러한 관찰시간의 선택에 의하여 고려되어야 할 전압변동의 가장 낮은 빈도 또는 반복율이 정의되고, 이것들이 수치화되어 multipoint algorithm에 의하여 계수들이 정의된다.

인지의 한계값을 $P_{st}=1$ 로 정의 하였으며, 이 조건은 60W 백열등 아래에서 독서를 하는 기준 관찰조건하에서 독서를 하는 사람의 50%가 인지할수 있다는 것을 이야기 하고, 일반적으로 $P_{st}<1$ 인 경우에는 플리커를 인지할수 없다고 보며, $P_{st}>1$ 인 경우에는 플리커를 인지할수 있는 것으로 정하였다. 이러한 플리커 곡선은 그림 6에 보여진다.

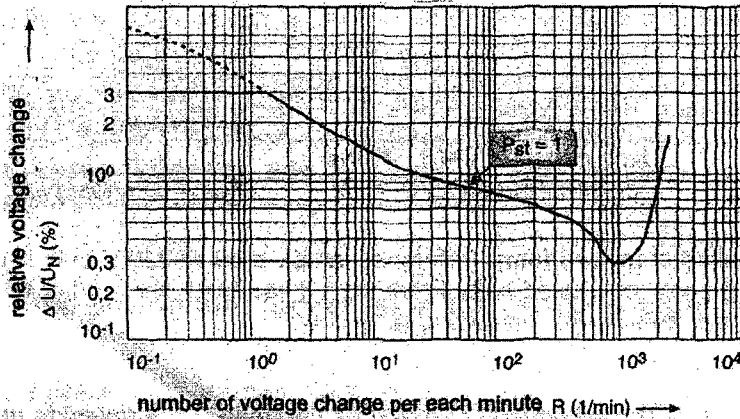


그림 6 플리커 인지곡선($\Delta U/U_N$:전압변화율)

P_{st} 의 계산에는 주기적으로 측정된 플리커 지수(최소한 초당 50개)의 값에 대한 누적확률밀도함수가 이용된다. 누적확률밀도함수의 모양은 전압요동의 성질에 따라서 매우 다르므로, 이것을 적당히 나타내기 위한 알고리즘으로서 multipoint algorithm이 사용되었다. multipoint algorithm을 이용하여 P_{st} 를 나타내면 식(4)과 같다.

$$P_{st} = \sqrt{(0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})} \quad (4)$$

이식은 10분관찰주기에 대해서 한계곡선의 모든점들에 대해 $P_{st}=1$ 을 주며, IEC에서 발행한 table에서

주어진 모든 한계 level에 대하여 검토되어 좋은 성능을 나타내었다. 그림 7은 플리커지수에 대한 측정예를 보여주며, 이것에 대한 누적확률분포의 히스토그램은 그림 8에 보여준다.

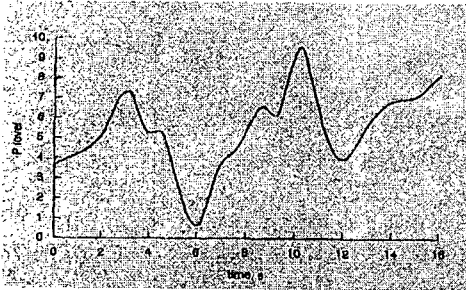


그림 7 플리커지수의 측정예

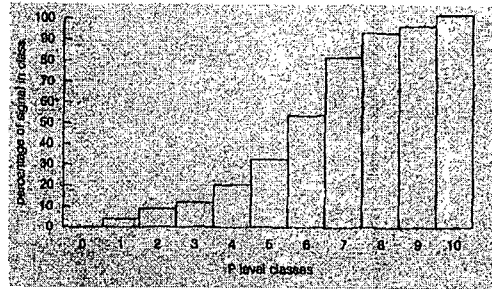


그림 8 누적확률분포

장기 플리커지수의 계산은 Cubic 평활화법이 사용되어 식(5)과 같이 나타내며, 120분의 경우 N=12가 된다.

$$P_{it} = \sqrt[3]{\frac{1}{N}(\sum P_{st,i}^3)} \quad (5)$$

4. 결론

전동차에서의 전압변동은 가선으로부터의 입력 전압에 의한 변동과 공기압축기, 냉난방 장치 등의 모터구동에 의한 전압변동 그리고 기타 전동차내 부하들에 의한 전압변동에 의해 발생하며, 이러한 전압변동은 전동차내부의 형광등에 플리커를 유발한다. 이러한 플리커의 특성을 이해하고, 측정하는 기술의 개발은 전동차의 승객들의 안정된 승차를 위해서는 매우 중요하다. 본 논문에서는 여러논문과 규격을 바탕으로 전압변동의 개념 및 플리커의 개념을 설명하였고, 플리커의 측정에서 중요한 flickermeter의 구조 및 원리를 살펴보았으며, 이러한 플리커를 평가하는 평가지수 및 평가에 대한 통계적방법을 간단히 살펴보았다. 이러한 연구를 바탕으로 전동차내에서의 플리커평가에 대한 보다 깊은 연구가 이루어져야할것으로 기대된다.

참고문헌

1. Wei-nan.C, et al, "The Influence of Voltage Flicker on Residential Lamps", IEEE, 1997.
2. IEC 61000-4-15, Edition 1.1, 2003-02
3. IEC 61000-3-3, Edition 1.1, 2002-03
4. Peter Ashmole, "Quality of Supply-Voltage fluctuations", Power Engineering Journal, June 2000
5. 김용상의 2인, "사무용 기기의 전기품질 영향 평가에 관한 연구" 전기설비학회논문지 제16권 제4호, 2002년 7월호
6. W. Schoeffler, et al, "Power Quality the new challenge", DEWETRON