

Probabilistic Method for The Harmonic Analysis of Railroad Feeding System

李 丞 懃* · 宋 學 宣** · 李 竣 敬*** · 金 鎮 吾†
 (Seung-Hyuk Lee · Hak-Seon Song · Jun-Kyong Lee · Jin-O Kim)

Abstract - The harmonic currents generated along with the operating speed of electrical railroad traction are very difficult to analyze because of its nonlinear characteristics. This paper therefore presents probabilistic approach for the evaluation of harmonic currents about the operating speed of the arbitrary single traction. To use probabilistic method for railroad system, PDF(Probability Density Function) using measuring data based on the realistic harmonic currents per operating speed is calculated. Measuring data of harmonic current per operating speed is obtained using the result data of PSCAD/EMTDC dynamic simulation based on an IAT(Intra Airport Transit) in Incheon International Airport. The means(expected values) and variances of harmonic currents of single traction also are obtained by the PDF of the operating traction speed and harmonic currents. The uncertainty of harmonic currents can be calculated through the mean and variance of PDF.

The probability of harmonic currents generated with the operating of arbitrary many tractions is calculated by the convolution of functions. The harmonics of different number of tractions are systematically investigated to assess the TDD(Total Demand Distortion) for the railroad system. The calculation of TDD was carried out using Monte-Carlo Simulations(MSCs) and the results of TDD evaluation of the power quality in the IAT power feeding system.

Key Words : Railway, Harmonic, Probability, TDD, Monte-Carlo Simulation(MCS)

1. 서 론

일반적으로 송·배전 계통은 3상 평형부하인 반면에 전기 철도부하는 단상 대용량 집중부하로 이동과 정지가 빈번하고, 부하변동이 극심한 전기적 특성을 갖고 있기 때문에 급전시스템에 전압강하로 인한 전압변동 및 전압불평형 등이 발생한다. 또한 현재 인버터 및 컨버터를 제어하기 위해 사용되는 전력전자 스위칭 소자의 사용으로 인한 고조파 등 많은 문제가 대두되고 있다. 이러한 맥락과 마찬가지로 전기철도 급전시스템의 전기철도 부하도 일반적인 부하특성과는 상이하게 물리적으로 부하위치가 빈번하게 변화하는 등 급전계통의 전기적 특성이 열차의 물리적 환경에 따라 변하기 때문에 그 특성이 고려되어야 하며, 전철변전소 고장이나 사고에 의한 연장급전이나 향후 교통량 증가에 의한 증대부하 운행 등에도 대처하지 않으면 안 된다. 만일 전기철도차량 한 대가 전철급전선에 운행될 경우 최대 고조파 전류는 최대 열차 견인력을 가지고 가속할 경우 발생할 수 있고, 동일한 급전선에

두 대의 전기철도차량이 운행될 경우, 드물겠지만 각각의 전기철도차량이 최대 견인력의 상대로 출발한다면, 심각한 고조파 발생 및 전압강하 문제가 발생할 수 있다. 더구나 전기철도 차량이 가속하는 상태에서 발생하는 고조파 전류는 지속적으로 변화되며, 만일 각각 전기철도차량에서 발생하는 특별한 차수의 고조파가 공진하여 그 크기가 커진다면 더욱 심각한 상황이 발생할 것이다.

따라서 본 논문에서는 전기철도차량 속도에 따라 발생하는 고조파 전류의 평가를 기존의 측정에 의한 데이터에 의해 고조파 평가가 이루어지는 결정론적인 방법이 아닌 고조파 전류를 확률변수로 두고 발생확률을 계산하는 확률론적 접근방법을 제시하고자 한다. 고조파 평가시 결정론적인 방법은 측정 장비를 통해 측정된 데이터를 이용하여 특정 시점에 대한 고조파 분석을 쉽게 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 연속적인 전력품질의 평가시 측정 장비의 실시간 측정의 한계와 장비의 고비용을 고려해야 한다는 단점을 지니고 있다. 또한 각 고조파에 대한 결정론적인 계산과정은 각 측정데이터가 정상상태(Steady State)라는 가정을 내포하고 있기 때문에 전기철도 급전시스템 및 상위시스템 변전소의 전력품질에 영향을 미치는 고조파 역시 정상상태로 평가하는 오류가 내포되게 된다. 특히 전기철도 차량은 시간에 따라 변하는 동적부하(Dynamic Load)이므로 연속적인 평가를 할 경우 결정론적인 방법은 한계를 지닌다.

확률론적 방법을 이용하여 전력품질 평가의 일환인 고조파 분석을 위해서는 전기철도차량 운행에 따라 발생하는 고조파

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 正教授 · 工博

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

* 正會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 工學碩士

*** 學生會員 : 漢陽大學校 電氣工學科 工學博士

接受日字 : 2006年 7月 19日

最終完了 : 2006年 8月 21日

전류의 실측데이터가 필요하다. 하지만 현재 국내사정상 필요한 과거 실측데이터를 얻기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 사례연구로 인천 국제공항철사의 IAT(Intra Airport Transit) 시스템 구축 사업계획을 바탕으로 실제 급전시스템과 동일한 시스템을 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계하였다. 설계된 급전시스템을 이용하여 운행 속도에 따른 전류의 고조파 전류를 산정하였고, 이를 바탕으로 속도에 대한 각 고조파 전류의 확률밀도함수를 계산하였다. 계산된 확률밀도함수의 평균과 분산을 이용하여 불확실한 미래의 발생할 수 있는 고조파 전류의 불확실성을 예측하였다. 또한 각 고조파 전류의 크기를 확률변수로 한 MCS(Monte-Carlo Simulation)를 통해 IAT 시스템의 확률론적 TDD(Total Demand Distortion)를 평가하였다.

2. PSCAD/EMTDC를 이용한 IAT 급전시스템 모델링

확률론적 고조파 평가를 위해 요구되는 실측데이터를 취득하기 위하여 우선 대상이 되는 인천 국제공항철사의 IAT 급전시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다.

PSCAD/EMTDC로 구현된 IAT 급전시스템은 설계 중인 실제 시스템과 동일하며, 따라서 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터를 실제 급전시스템의 측정데이터로 가정하고 고조파 평가를 행하였다.

그림 1은 인천 국제공항철사의 IAT 시스템 구축 사업에 대한 대략적인 구조를 보여준다. 경전철 구축사업이 완료되면 Terminal I, Concourse A, B, C, D까지 확장된다. 본 논문에서는 전체 IAT 급전시스템이 완료된 시점을 가정하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 그림 2는 그림 1의 일부인 Terminal I의 급전시스템을 보여준다. 한전에서 22.9 kV를 수전 받아 스타결선 변압기와 정류기를 통해 직류 750 V를 경전철에 공급하는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 경전철의 제동시 발생하는 전력을 이용하기 위해 회생제동을 위한 인버터도 설계시 고려되었다.

그림 3은 변압기를 통해 154 kV를 22.9 kV로 감압하여 AC/DC 변환부에 급전하는 정류기 및 인버터에 대한 하위 시스템에 대한 설계로써 AC/DC 정류기 2대와 회생제동시 발생하는 전력을 상위 계통으로 변환하여 보내주는 인버터 1대로 구성된 설계 모델을 보여준다[3-6,9].

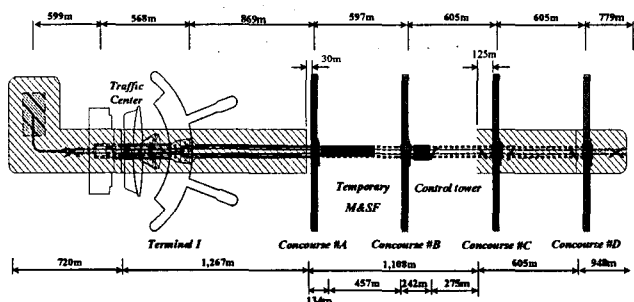


그림 1 인천 국제공항철사의 IAT 시스템 개략도
Fig. 1 A Drawing of the IAT system in Incheon international airport

본 논문에 사용된 전기철도차량 운행에 따른 고조파 발생에 관한 데이터는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 설계된 급전시스템을 바탕으로 시뮬레이션 하였고, FFT(Fast Fourier Transformation)를 이용하여 분류된 각 차수 고조파 전류는 상위시스템(한전시스템)에 영향을 미치는 지점인 154/22.9 kV 변전소 2차측에서 측정하였다.

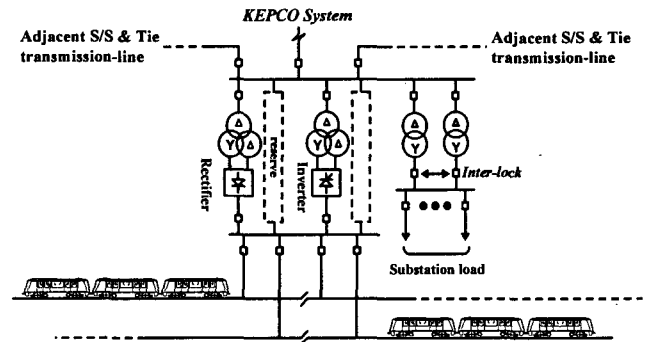


그림 2 인천 국제공항철사의 IAT 경전철 급전시스템 단선도
Fig. 2 The single-diagram of IAT system in Incheon international airport

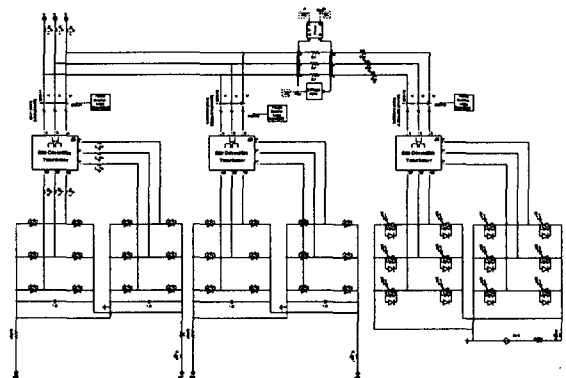


그림 3 PSCAD/EMTDC로 모델링 한 정류기 및 인버터
Fig. 3 Rectifier and inverter modeling using PSCAD/EMTDC

그림 4는 80 kW/량 IAT 시스템의 경전철 차량에 대한 PSCAD/EMTDC 구현 모델을 보여준다[5-6].

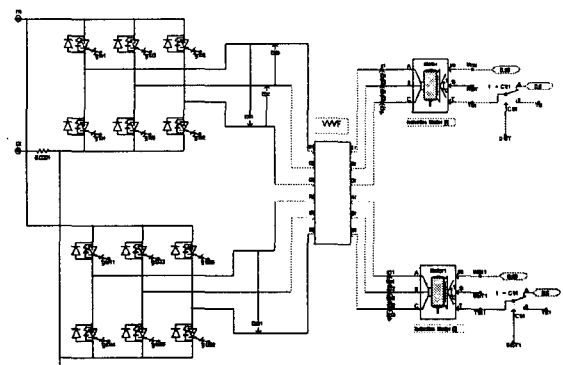


그림 4 PSCAD/EMTDC로 모델링 한 전기철도차량
Fig. 4 Electrical trainload modeling using PSCAD/EMTDC

3. 확률론적 방법을 이용한 고조파 평가

그림 5는 확률론적 방법을 이용한 고조파 평가방법을 수행하기 위한 순서도를 보여준다. 그림 5와 같이 확률론적 TDD 평가방법을 수행하기 위해 가장 선행되어야 할 것은 전기철도차량운행에 따른 고조파 전류에 관한 과거 운행실적데이터 취득으로 제 2 장에서 언급하였듯이 인천 국제공항철사 IAT 시스템 모델링을 이용하여 그림 4와 같이 모델링 된 열차의 유도전동기 동작특성을 매 경우 다르게 하여 측정된 시뮬레이션 결과를 수십 회 반복하여 취득하고 분석에 맞는 데이터가 되도록 처리하였다.

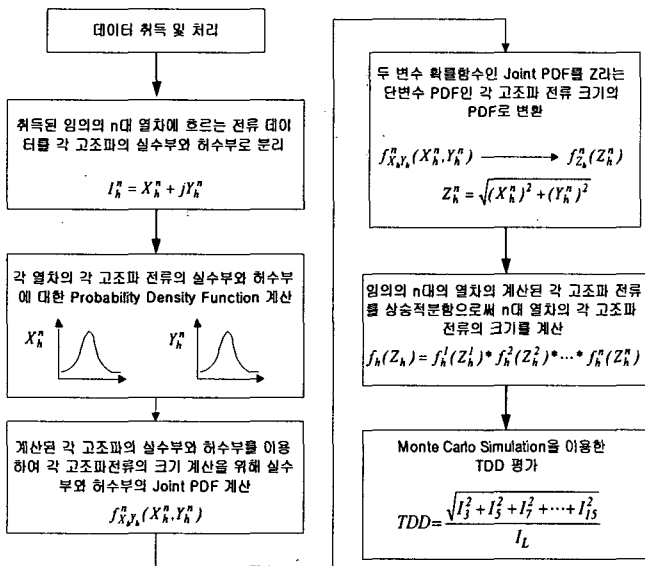


그림 5 확률론적 평가방법을 위한 순서도
Fig. 5 The flowchart of probabilistic assessment

3.1 속도의 확률밀도함수 계산

인천 국제공항철사 IAT 시스템에서 운행될 경전철 차량의 구동은 차량 내부의 스코트변압기를 통하여 단상 전원을 스위칭 소자로 제어되는 컨버터 및 인버터를 통하여 3상 교류 전원으로 변환하여 유도전동기를 구동하는 방식이다. 이런 스위칭 소자의 이용은 고조파 전류의 발생에 주된 원인이 된다. 운행되는 속도(v)에 따라 발생하는 각 차수 고조파는 식 (1)과 같이 실수(Real)부분과 허수(Imaginary)부분으로 표현된다[2].

$$I_h(v) = \sum_{k=1}^{\infty} X_h(v) + j \sum_{k=1}^{\infty} Y_h(v) \quad (1)$$

여기서, h : 고조파 차수

X, Y : 고조파 전류의 실수부와 허수부

전기철도 급전시스템은 동적부하인 전기철도차량의 운행 속도에 따라 발생하는 고조파 전류의 크기가 변화하게 되고, 각 고조파의 필터링을 위해 FFT를 이용한 임의의 측정 시간의 속도에 따른 각 차수 고조파(기본파~15차 고조파)의 크기와 위상을 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

고조파 전류는 전기철도차량의 운행속도에 따라 다르기 때

문에 전기철도차량(이하 열차)의 운행속도는 고조파의 확률론적 분석기법에서 확률변수로 정의된다. 그림 8은 열차의 운행속도의 확률분포곡선으로 인천 국제공항철사의 IAT 시스템을 PSCAD/EMTDC로 구현하고 차량의 동작특성을 매 경우 다르게 하여 측정된 시뮬레이션 결과를 수십 회 반복하여 취득하였다.

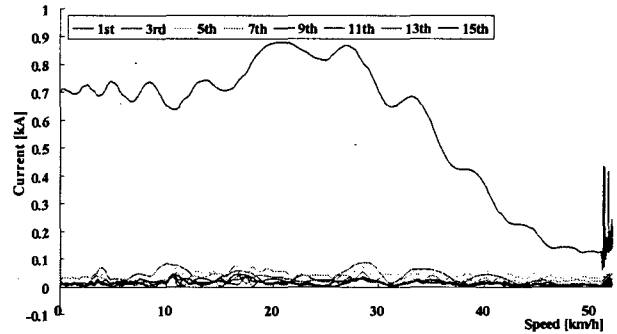


그림 6 속도에 따른 고조파 전류의 크기
Fig. 6 The profiles of current's magnitude vs. speed

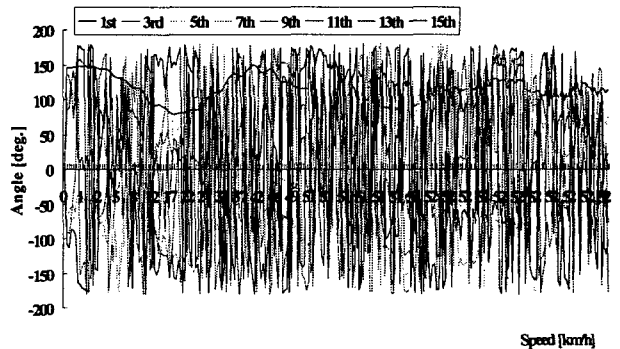


그림 7 속도에 따른 고조파 전류의 위상
Fig. 7 The profiles of current's angle vs. speed

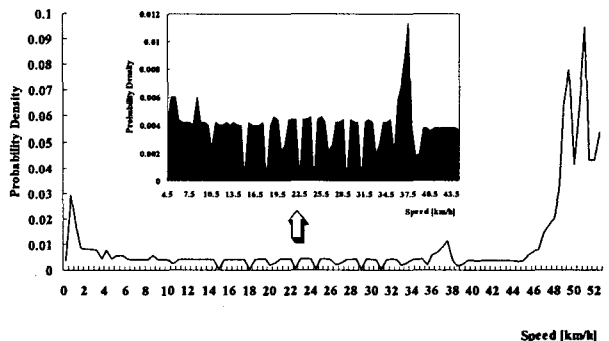


그림 8 속도의 확률밀도함수
Fig. 8 The train speed's probability density function

그림 8에서 알 수 있듯이 46 [km/h]이후 구간의 확률도 더 크다는 것을 알 수 있는데 이것은 차량의 정상적으로 운행하는 구간에 대한 확률밀도를 의미한다. 각 속도 구간은

[km/h]로 분리하였고, 속도의 증분량(Δv)은 1 [km/h]이다. 임의의 속도 v 의 확률은 식 (2)와 같이 정의된다[1].

$$P_{v_i} = (v_i < V < v_{i+1}) \quad (2)$$

식 (2)의 확률은 주어진 그림 8의 확률밀도함수로부터 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_{v_i} = \frac{(P_{v_i} + P_{v_{i+1}})}{2} \Delta v_i \quad (3)$$

여기서, Δv_i : 임의의 구간에서의 속도의 증분량

3.2 각 차수 고조파 전류의 실수부와 허수부에 대한 확률밀도함수(PDF) 계산

총 흐르는 전류를 필터링 한 결과로 나타나는 각 고조파 전류는 중심극한이론(Central Limit Theorem)에 이용하면 각 차수 고조파 전류는 정규분포(Normal Distribution)를 따른다고 정의될 수 있으며, 정규분포 함수는 식 (4)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

따라서 식 (4)의 확률밀도함수를 계산하기 위해서는 평균(μ)과 표준편차(σ)의 추정치를 먼저 계산하여야 한다. 우선 고조파 전류의 실수부의 기대값의 추정치 $\widehat{\mu}_{X_h}$ 와 실수부 표준편차의 추정치 $\widehat{\sigma}_{X_h}$ 는 식 (5), (6)과 같이 표현된다. 즉, 임의의 열차 운행속도 v 에서의 확률 $P(v)$ 와 그 속도일 경우 발생하는 고조파 전류의 실수값 $X_h(v)$ 의 곱에 대한 적분으로 정의된다.

$$\widehat{\mu}_{X_h} = \int_0^{\max} X_h(v)P(v)dv = \sum_{v=0}^{\max} X_h(v)P_v \quad (5)$$

$$\widehat{\sigma}_{X_h} = \sqrt{\sum_{v=0}^{\max} X_h(v)^2 P_v - \widehat{\mu}_{X_h}^2} \quad (6)$$

각 차수 고조파 전류의 실수부분 계산과 마찬가지로, TDD를 평가하기 위해 입력변수로 사용될 각 차수 고조파 전류의 허수부 기대값 $\widehat{\mu}_{Y_h}$ 과 표준편차의 추정치 $\widehat{\sigma}_{Y_h}$ 는 식 (7)과 (8)로 정의된다.

$$\widehat{\mu}_{Y_h} = \int_0^{\max} Y_h(v)P(v)dv = \sum_{v=0}^{\max} Y_h(v)P_v \quad (7)$$

$$\widehat{\sigma}_{Y_h} = \sqrt{\sum_{v=0}^{\max} Y_h(v)^2 P_v - \widehat{\mu}_{Y_h}^2} \quad (8)$$

표 1은 열차 1대가 운행될 경우 각 고조파에 대한 기대값과 표준편차의 추정치를 식 (5)~(8)을 이용하여 계산한 결과이다.

표 1 고조파 전류의 평균과 표준편차

Table 1 The mean and standard deviation of harmonic currents

고조파 차수	실수부		허수부	
	$\widehat{\mu}_{X_h}$	$\widehat{\sigma}_{X_h}$	$\widehat{\mu}_{Y_h}$	$\widehat{\sigma}_{Y_h}$
1st	-181.334	96.07064	373.8896	183.688
3rd	-2.53051	9.418029	1.796508	10.11796
5th	5.868456	20.70065	3.717592	20.63691
7th	3.696483	14.616	5.457339	18.65329
9th	-0.42805	4.307776	0.865201	4.470332
11th	-1.42176	5.78774	2.222699	6.232748
13th	1.944513	6.759347	0.718944	8.71899
15th	-0.06358	4.200213	0.785194	4.675389

3.3 고조파 전류의 실수부와 허수부의 결합 확률밀도함수

전류의 분배라는 물리적인 측면에서 전철변전소에서 공급되는 전류는 n 개의 열차에 독립적으로 공급되며 이는 각 열차 운행에 독립적이다. 즉, 이러한 물리적 현상을 수학적으로 모델링하면 독립적인 확률변수 x_i 가 n 개 주어질 때 이들의 합은 x_i 로 나타낼 수 있다. 또한 이것은 n 개의 기대치의 합(μ_i)과 표준편차의 합(σ_i)을 가진 확률밀도함수이다. X_i 와 Y_i 가 공동으로 정규분포라는 것을 증명하기 위해 선형결합 $aX_i + bY_i$ 는 모두 a 와 b 에 대하여 정규분포라는 것을 증명하는 것으로 설명할 수 있다. 선형결합은 식 (9)와 같다.

$$aX_{i,h} + bY_{i,h} = \sum_{i=1}^N aX_{i,h} + \sum_{i=1}^N bY_{i,h} = \sum_{i=1}^N (aX_{i,h} + bY_{i,h}) \quad (9)$$

$X_{i,h}$ 와 $Y_{i,h}$ 의 성분은 물리적인 양이므로, 이들의 평균과 분산은 유한해야 한다. 따라서, n 이 충분히 크다면 중심극한정리에 의해 $aX_{i,h} + bY_{i,h}$ 가 정규분포를 따른다고 결론지을 수 있다. 두개의 확률분포를 하나의 확률분포 함수로 나타낼 수 있는 결합 확률밀도함수(JPDF: Joint Probability Density Function)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다[7-8].

$$f_{xy}(x_i, y_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_{xt}\sigma_{yt}\sqrt{1-\rho_i^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho_i^2)}(A)} \quad (10)$$

여기서, A 는 아래와 같이 정의된다.

$$A = \frac{(x_i - \mu_{xt})^2}{\sigma_{xt}^2} - \frac{2\rho_i(x_i - \mu_{xt})(y_i - \mu_{yt})}{\sigma_{xt}\sigma_{yt}} + \frac{(y_i - \mu_{yt})^2}{\sigma_{yt}^2}$$

각 변수 μ_{xt} , μ_{yt} 는 실수와 허수부 고조파의 평균의 합이고 σ_{xt} , σ_{yt} 는 실수부와 허수부의 표준편차의 합을 그리고 ρ_i 는 실수부와 허수부의 고조파의 상관계수의 합을 의미한다. 이 변수들은 다음 식 (11)~(13)을 이용하여 계산한다.

$$\mu_{xt} = \sum_{i=1}^n \mu_{xi}, \mu_{yt} = \sum_{i=1}^n \mu_{yi} \quad (11)$$

$$\sigma_{xt} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{xi}^2}, \sigma_{yt} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{yi}^2} \quad (12)$$

$$\rho_t = \frac{C(X_t, Y_t)}{\sigma_{xt}\sigma_{yt}} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \sigma_{xi} \sigma_{yi}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n \sigma_{xi}^2)(\sum_{i=1}^n \sigma_{yi}^2)}} \quad (13)$$

여기서, $\rho_i = \frac{C_i}{\sigma_{xi}\sigma_{yi}} = \frac{E_i(X_i Y_i) - \mu_{xi}\mu_{yi}}{\sigma_{xi}\sigma_{yi}}$ (단, $|C| \leq \sigma_x \sigma_y, |\rho| < 1$)

그림 9는 식 (10)을 이용하여 나타낸 그래프로써 총 고조파 전류의 실수와 허수 두 개의 확률변수(x_t, y_t)로 이루어진 고조파 전류의 3차원 확률밀도함수이다. 그림에서 x 축과 y 축은 실수부와 허수부의 고조파를 의미하고 z 축은 함수값 $f_{xy}(x_t, y_t)$ 을 의미한다.

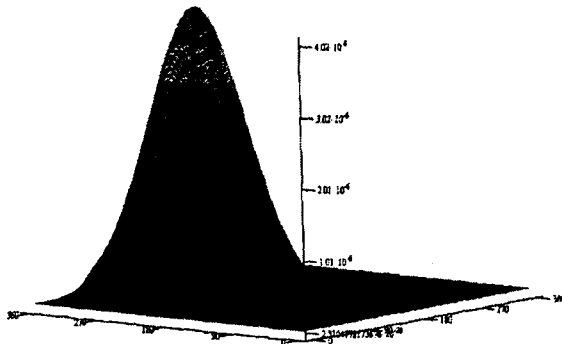


그림 9 한대의 차량이 운행될 때의 JPDF
Fig. 9 The JPDF of 3-dimension when single trainload operates

3.4 임의의 열차 한 대 운행에 따라 발생하는 총 고조파 전류의 크기에 대한 PDF

위의 제 3.3 절에서 JPDF는 고조파의 실수와 허수 두 개의 확률변수의 함수로 정의하였다. TDD 평가를 위해서는 발생하는 고조파의 크기만 필요하다. 따라서 두 개의 확률변수 함수를 하나의 확률변수 전류의 크기($Z = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2}$)에 대한 확률밀도함수로 나타내기 위해서 전류의 크기 Z 는 식 (14)와 같이 정의된다.

$$Z = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N X_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N Y_i\right)^2} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (14)$$

고조파 전류 $f_z(z)$ 에 대한 PDF를 얻기 위해서 실수부와 허수부의 고조파 전류들 크기에 대한 함수로 표현하면 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_z(z) = \int_{y=-z}^z \int_{x=-\sqrt{z^2-y^2}}^{\sqrt{z^2-y^2}} f_{xy}(x_t, y_t) dx dy \quad (15)$$

식 (15)를 정리하면 다음 식 (16)과 같다.

$$f_z(z) = \int_{-z}^z \frac{z}{\sqrt{z^2-y^2}} A dy \quad (16)$$

여기서, $A = f_{xy}(\sqrt{z^2-y^2}, y) + f_{xy}(-\sqrt{z^2-y^2}, y)$

각 고조파 전류 크기에 대한 확률밀도함수(PDF)는 식 (16)을 이용하여 계산된다.

그림 10과 11은 식 (16)을 이용하여 계산한 임의의 두 대의 열차(열차 #1, 열차 #2)가 운행됐을 경우, 각 열차에 대하여 발생하는 3차 고조파 전류와 전체 전류 크기에 대한 확률밀도함수를 각각 나타낸 것이다.

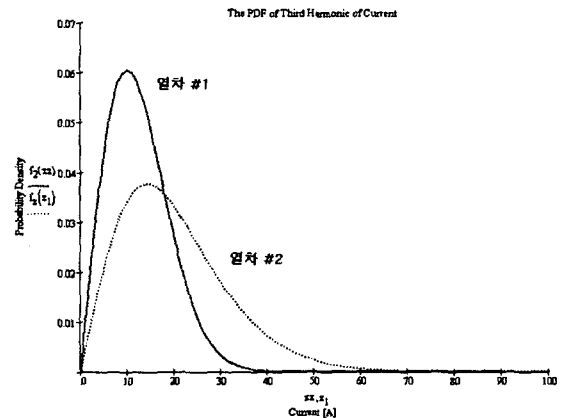


그림 10 3차 고조파 전류의 크기에 대한 PDF
Fig. 10 The PDFs of 3rd harmonic current's magnitudes

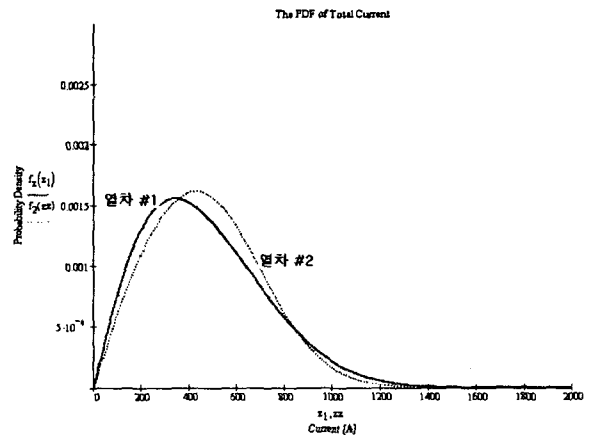


그림 11 전체 전류의 크기에 대한 PDF
Fig. 11 The PDFs of total harmonic current's magnitudes

3.5 상승적분(Convolution)을 이용한 임의의 N대의 열차 운행에 따른 고조파 전류의 크기에 대한 PDF

각각의 차량운행에 따른 고조파 전류의 크기에 대한 PDF의 결과를 기초로 하여 N 대의 전기철도차량이 운행될 경우로 확률론적 해석방법을 확장할 수 있다. 이는 각 전기철도차량의 운행은 물리적으로 상호 독립적이라는 것을 확률적인 개념으로 확장했기 때문에 가능하다. 따라서 확률적으로 각 전기철도차량에서 발생하는 고조파는 독립적이다. 각 전기철

도차량에서 발생하는 고조파 전류는 확률변수이기 때문에 이는 수학적으로 상승적분(Convolution)을 통해 하나의 확률변수로 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(z) = f_1(z) * f_2(z) * \dots * f_n(z) \quad (17)$$

만일 임의의 두 대의 차량이 독립적으로 운행될 때의 고조파 전류의 크기에 대한 PDF의 계산은 이미 각각의 차량이 독립적이라고 가정했으므로, 고조파 전류의 크기에 대한 PDF의 상승적분은 식 (18)과 같이 정의된다.

$$f_z(z) = \int_0^z f_x(z-z_2)f_y(z_2) dz_2 \quad (18)$$

여기서, $f_x(z_1)$, $f_y(z_2)$: 각 임의의 열차 #1과 #2의 PDF

그림 12와 13은 열차가 2대 운행됐을 경우 발생하는 고조파 중 3차 고조파 전류의 크기와 전체 고조파 전류의 크기를 상승적분 후 전류의 크기에 대한 PDF로 표현한 것이다.

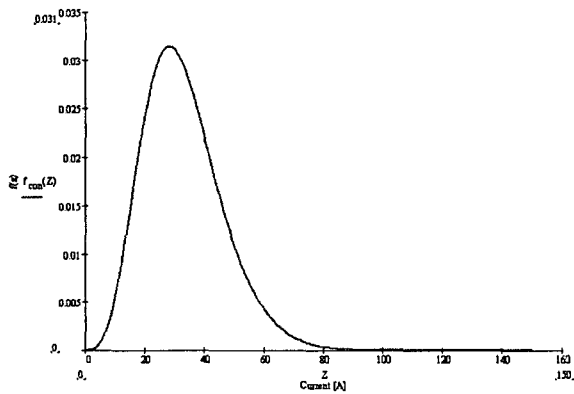


그림 12 철도차량 두 대가 운행될 때의 3차 고조파 전류의 크기에 대한 PDF
 Fig. 12 The PDF for 2 random variables using convolution (3rd harmonic currents)

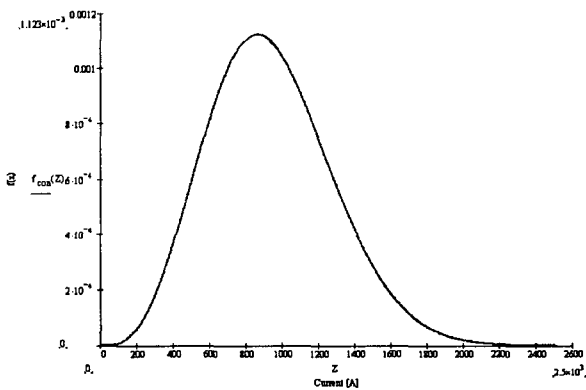


그림 13 철도차량 두 대가 운행될 때의 전체 전류의 크기에 대한 PDF
 Fig. 13 The PDF for 2 random variables using convolution (total harmonic currents)

4. 확률론적 TDD 지수 평가

4.1 고조파 관련규정

본 논문에서 주요 목적으로 다루고 있는 고조파 분석은 일반적으로 파형의 왜곡으로 간주된다. 고조파는 주 전압과 부하 전류 파형에서 주된 왜곡 요소이기 때문이다. IEEE 519:1992 규정은 전력계통에서 고조파의 주요 근원을 설명한다.

이 규정에서 설명되는 고조파의 근원은 전력 변환기와 아크 용광로, 정적인 VAR 보상기, 분산 발전기의 인버터, 전력의 위상 제어, 컨버터, 스위치 모드 전력 공급장치 등을 포함한다. IEEE-519에 의한 고조파 기준은 전류와 전압에 규정하였다.

$$TDD = \left(\sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_k^2} \right) / I_L \quad (19)$$

표 2의 TDD는 [%]로 표현된 최대 부하전류에서 고조파 전류 왜곡으로 정의되며, I_{sc} 는 최대 단락전류, I_L 은 기본 주파수 요소의 최대 부하전류를 의미한다. 수학적으로 TDD는 식 (19)와 같다. 또한 표 2는 홀수 고조파에 대한 규정을 보여주고 있으며, 짝수 고조파의 규제치는 홀수 고조파의 25 [%] 이내로 정의되어 있다.

본 논문에서는 인천 국제공항청사의 IAT 시스템 구축 사업계획을 바탕으로 SCR(Short-circuit Current Ratio)이 1000을 초과하는 경우에 대하여 TDD를 평가하였다.

표 2 일반적인 배전시스템에 대한 전류 왜곡 제한 규정
 Table 2 Current distortion limits for general sub-transmission systems

$SCR = I_{sc}/I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)		
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$
<20	4.0	2.0	1.5
20-50	7.0	3.5	2.5
50-100	10.0	4.5	4.0
100-1000	12.0	5.5	5.0
>1000	15.0	7.0	6.0

$SCR = I_{sc}/I_L$	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)		
	$23 \leq h < 35$	$35 < h$	TDD [%]
<20	0.6	0.3	5.0
20-50	1.0	0.5	8.0
50-100	1.5	0.7	12.0
100-1000	2.0	1.0	15.0
>1000	2.5	1.4	20.0

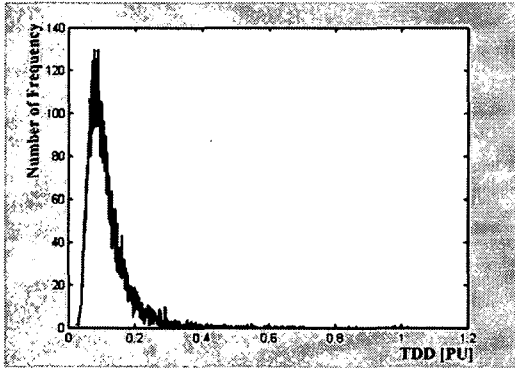
4.2 MCS를 이용한 TDD 계산

식 (19)처럼 최대 부하전류에서 고조파 전류 왜곡으로 정의되는 TDD를 결정론적인 방법으로 계산하기 위해서는 각 차수 고조파 전류의 크기만이 필요하다. 하지만 본 논문에서 제시한 확률론적 방법에 의한 분석에서 각 차수 고조파에 전류는 확률변수이기 때문에 해석적인 통계기법에 의한 계산방법으로는 이와 같은 다중 확률변수를 갖는 TDD를 계산하는 것이 거의 불가능하다. 그 이유는 TDD 계산에 각 변수인 각

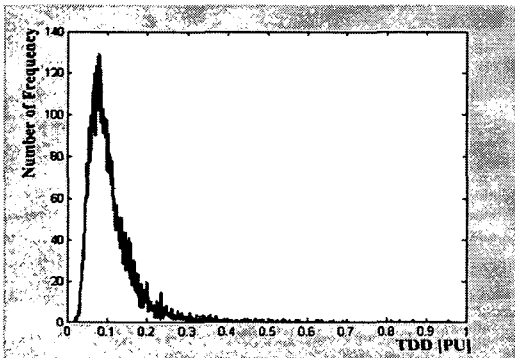
차수 고조파 전류의 크기가 모두 확률변수이기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 시뮬레이션에 의한 계산법인 MCS (Monte-Carlo Simulation) 기법을 이용하여 각 고조파의 난수를 발생시켜 TDD를 계산하였다. 시도횟수는 10,000이고, 각 고조파 평가는 표 2에서 나타낸 것과 같이 각 조건별 ($h < 11$, $11 \leq h < 17$, 전체 고조파 - 굵은 표시) TDD로 평가하였다.

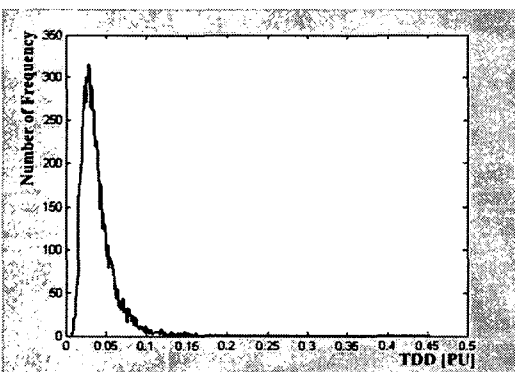
그림 14는 각 등급별 TDD의 결과의 PDF를 보여준다. 그림 15는 그림 14의 PDF를 각 조건별 TDD의 누적밀도함수 CDF(Cumulative Density Function)로 표현한 그래프이다.



(a) 전체 고조파 전류에 대한 TDD의 PDF



(b) $h < 11$ 고조파 전류에 대한 TDD의 PDF



(c) $11 \leq h < 17$ 고조파 전류에 대한 TDD의 PDF

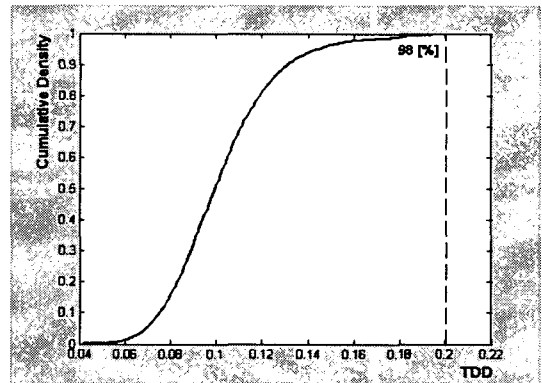
그림 14 각 등급별 고조파 전류에 대한 TDD의 PDF

Fig. 14 The PDF of TDD for total harmonic currents using MCS

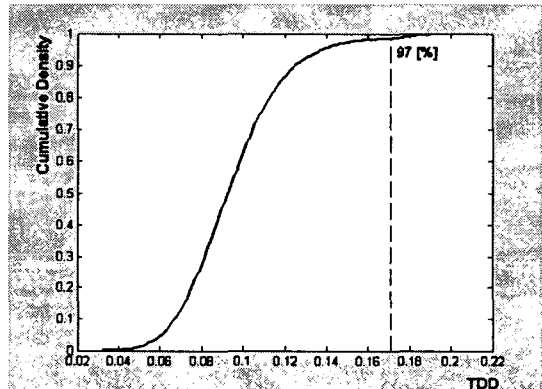
각 조건별 TDD의 CDF에서 IEEE 기준 허용범위를 위해

하는 경우의 확률은 열차가 여러 대가 동시 운행한다든지, 단지 몇 대의 열차가 운행되는 상황이라도 각 열차들이 모두 최대전인력(최대 토크)으로 운행하는 등의 최악의 상황에 대한 결과가 된다.

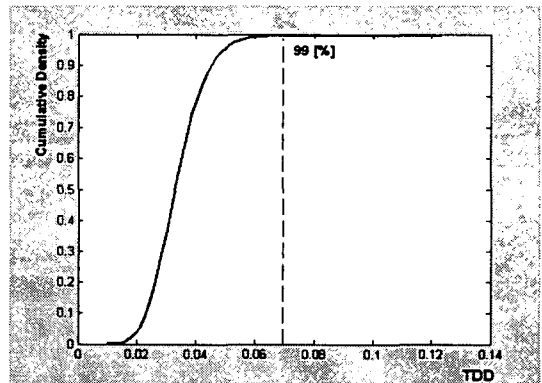
본 논문에서 제시한 확률론적 고조파 평가방법을 이용하여 전기철도 급전시스템 운영자(관리자)는 일어날 확률이 작지만 무시할 수 없고 언제인가는 발생할 수 있는 최악의 상황을 고려하여 필터의 설치라든지 또는 운행 스케줄 등을 적절하게 변경함으로써 전기철도 급전시스템 및 상위 한전계통이 안정성을 유지하며 운영될 수 있게 해야 한다.



(a) 전체 고조파 전류에 대한 TDD의 CDF



(b) $h < 11$ 고조파 전류에 대한 TDD의 CDF



(c) $11 \leq h < 17$ 고조파 전류에 대한 TDD의 CDF

그림 15. 각 등급별 고조파 전류에 대한 TDD의 CDF

Fig. 15 The CDF of TDD for total harmonic currents using MCS

5. 결 론

본 논문에서는 전력품질에 좋지 않은 영향을 미치는 고조파 전류에 대한 평가를 기존의 결정론적인 방법이 아닌 확률론적인 방법을 이용하여 접근하였다. 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 인천 국제공항청사의 IAT 시스템을 모델링하고, 실제와 동일하게 구현된 급전시스템의 시뮬레이션 결과로 전기철도 차량 운행이력에 관한 데이터를 산정하였다. 다양한 운행조건(급제동, 가·감속 지령, 돌발상황 등)을 고려한 반복된 시뮬레이션 결과의 데이터로부터 각각의 전기철도 차량에 대한 전체 전류 및 각 차수 고조파 전류의 크기에 대한 PDF를 계산하였고, MCS를 이용하여 전력품질 평가지수 중 하나인 TDD를 확률변수로 한 확률밀도함수를 계산하였다. 인천 국제공항청사 IAT 건설 시방서에 의해 발생된 고조파의 IEEE 기준 위반 여부의 확률을 계산하였다. 분석결과 모든 등급에 걸쳐 97 [%] 이상이 모두 규정범위에 속해 있음을 확인할 수 있었고 이는 정상상태에 대해 결정론적으로 평가한 TDD와 일치함을 알 수 있었다[3]. 규정범위를 위반한 경우의 확률은 여러 대의 전기철도 차량이 동시 운행한다든지, 단지 몇 대의 열차가 운행되는 상황이라도 각 열차들이 모두 최대전력(최대 토크)으로 운행하는 등의 최악의 상황에 대한 결과가 된다.

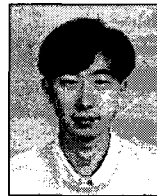
본 논문에서 제안한 확률론적 방법을 이용하여 다수의 전기철도 차량으로 확장하여 고조파를 평가함으로써 변전소 설비의 용량이나 철도 배전계통의 상위 송전계통에 미치는 영향, 또는 전기철도 급전시스템 설계시 하나의 지표로 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] W. E. Kazibwe, T. H. Ortmeier, M. S. and A. A. Hammam, "Summation of Probabilistic Harmonic Vector," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 621-628, 1989.
 [2] 송학선, 이준경, 이승혁, 김진오, 김형철, "철도계통 고조파 분석에 확률론적 방법 적용", 대한전기학회 하계 학술대회, 2005, pp. 214-216.
 [3] 이준경, 이승혁, 김진오, 정현수, "인천 국제공항청사 경전철 도입에 따른 고조파 영향 분석", 대한전기학회 하계 학술대회, 2005, pp.238-240.
 [4] IAC/Lea+Elliott Inc., *Incheon International Airport IAT(Intra-Airport Transit) System Project Request for Proposal*, Vol. 2, May 2003.
 [5] *PSCAD/EMTDC User's Guide V. 4.02*, Manitoba HVDC Research Centre Inc., 2003.
 [6] Seung-Hyuk Lee, Jin-O Kim and Hyun-Soo Jung, "Analysis of Catenary Voltage of AT-Fed AC HSR System," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 6, pp. 1856-1862, November 2004.

[7] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1991
 [8] Alan Stuart, J. Keith Ord, *Kendall's Advanced Tehory of Statistics*, 6th Ed. Edward Arnold, 1994
 [9] Neo Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics*, 2nd Ed, John Willy & Sons. 1995

저 자 소 개



이 승 혁 (李 丞 熾)

1974년 8월 3일생. 2003년 한양대학교 전기공학과 공학석사. 2003년~현재 한양대학교 전기공학과 박사수료.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : leesh93@hanyang.ac.kr



송 학 선 (宋 學 宣)

1979년 2월 20일생. 2004년 군산대학교 전자공학부 졸업(학사). 2006년 2월 한양대학교 전기공학과 공학석사.

Tel : 02-2220-0347



이 준 경 (李 俊 敬)

1962년 1월 29일생. 1993년 서울산업대학교 전기공학과 졸업(학사). 2001년 한양대학교 전기공학과 석사. 2006년 8월 한양대학교 전기공학과 공학박사.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jklee7788@naver.com



김 진 오 (金 鎭 吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 1991년 12월 Texas A&M대학교 전기공학과 공학박사. 현재 한양대학교 전자전기공학부 정교수.

Tel : 02-2220-0347

Fax : 02-2297-1569

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr