

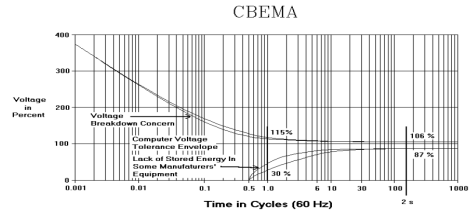
유도전동기 운전 중 Sag 영향에 의한 고조파 차수 변화

박인덕*, 이승환* 김시경**
 대덕대학*, 공주대학교**

Induction Motor Effect for Variation Sag, Swell of Harmonic Order

In-Deok Park*, Seung-Hwan Lee*, Si-Kyung Kim**
 Daeduk College*, Kongju National University**

Abstract - In this paper, the voltage harmonics are investigated in terms of the voltage sag versus the time constants of electric machinery under the source voltage variation condition. The electric machinery and compensation equipment are established on the proposed design scheme based on voltage quality effect assessment technology. It have been analyzed how the variation of harmonic order, the output current, the DC-Link voltage and the induction motor speed is carried out under the voltage sag and switching frequency variation.



<그림 2> CBEMA 곡선

1. 서 론

21C 전력전자기술은 고감도, 고정밀, 초소형, 고속 DSP(Digital Signal Processor), 전력용반도체 스위칭소자를 이용하여 전력전자기술을 발전시켰다. 전력전자기술을 이용한 전기기기들은 산업현장, 자동화사업장, 의료산업 등 많은 산업분야에서 사용한다. 이들 기기는 전압강하 및 전압변동에 민감하게 동작한다. 산업현장에서 유도전동기 속도제어로 사용되는 인버터는 전력용반도체 소자의 스위칭을 이용한 비선형 부하로서 고조파 전류를 발생시켜 전류파형왜곡, 과도한 중선선 전류에 의한 축적오차, 계측기 오동작이나 일시정지등 많은 고조파 장애를 일으킬 수 있다. 특히 순간 전압강하 (Voltage Sags)와 순간정전 현상(Interruptions)에 따른 단자전압 저하, 고조파의 영향에 배제되었던 대다수 산업현장의 사용하는 유도전동기 운전 중 발생하는 고조파 차수 변화에 대한 연구는 이루어지고 있지 않다. 본 논문에서는 유도전동기 운전 중 Sag(전압강하) 변화에 따른 고조파 차수 변화와 출력전류, DC-Link 전압, 유도전동기의 속도 변화를 시뮬레이션으로 제시하고자 한다.

고조파가 전기설비기에 미치는 장애의 영향을 표 1에 나타내었다.

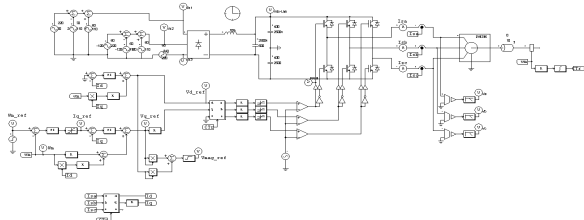
<표 1> 고조파가 전기설비기에 미치는 장애의 영향

분류	기기명	장 해 현 상	장애의 영향
수변전설비 배선용 기기	변압기	과부하, 과열, 이상음	
	3상4선식 중성선	과열	
	배선용차단기	오동작	
	누전차단기	오동작	
산업용 기기	유도전동기	2차측과열, 이상음, 진동 효율저하	회전수 변동, 수명저하
	로봇 제어기, 위치결정제어 기법용인버터	특정부품의 과열	오동작
	속응형 인버터	검출오차	
제어용 기기	사이리스터 제어기기 정지형 인버터, 센서	위상지연에 의한 오동작	수명저하
전자용용 기기	FA,OA 컴퓨터,PLC, CAD 워크 스테이션, X선 마이크 로 분석기	전원회로 부품이 과열 화 상잡음, 오동작	

2. 본 론

2.1 전압품질^[1~2]

전압품질의 정도를 나타내는 평가지표로서는 일반적으로 주파수 유지율과 전압유지율 그리고 순시전압저하, 순시전압상승, 고조파왜율, 전압불평형, 순간정전등과 같은 미소외란의 요소들이 고려되고 있다. 그림 1은 Sag 변화에 따른 인버터 출력전류, DC-Link전압, 유도전동기 속도변화등 계통에 영향을 주는 유도전동기 출력전류의 고조파 차수변화를 시뮬레이션 하기위한 회로를 나타낸다.



<그림 1> 유도전동기 시뮬레이션 회로도

전압강하의 국제적인 규격으로 IEEE std^[3], SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) F47 등이 있으며, 전원의 정밀기기에 대한 영향 평가 및 기준설정의 CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association)곡선, ITIC(Information Technology Industry Council) 곡선으로 규정하고 있다. 순간전압강하 시간에 따른 전기기기의 동작영역을 그림 2에 나타내었다. 이들 영역은 Sag 시간에 대한 기기의 동작여부를 나타낸다. 또한, Sag에 의한 고조파 전류 영향에 의한 유도전동기의 출력전류, 속도, DC-Link 전압강하로 인한 유도전동기의 동작여부를 판단하는 기준이 된다.

2.2 전압강하에 의한 고조파 차수 변화

2.2.1 고조파

이상적인 전력 시스템 장치는 손실이 없는 유효전력은 식(1)으로 표현이 된다.

$$p(t) = v(t)i(t) = VI \sin^2(\omega t)$$

$$\omega = 120\pi * 377 \text{ rad / sec}$$
(1)

전압품질에 영향을 주는 요소로서는 정전, 전압강하, 역률, 변환기(및 또는 스위칭 손실), 비선형 정상상태 부하상태(고조파)등이 있다. 정상상태의 주기를 갖는 기본식을 Fourier 변환 표현하여 식(2)에 나타내었다.

$$v(t) = V \sin(\omega t), i(t) = I \sin(\omega t)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\pi \frac{t}{T}) + b_n \sin(n\pi \frac{t}{T})$$
(2)

여기서 $a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos(n\pi \frac{t}{T}) dt$, $b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin(n\pi \frac{t}{T}) dt$
 $f(t)$ = 시간함수, n=고조파 차수, T =한주기의 시간.

전력시스템 고조파의 정의는 전압과 전류 파형의 위치와 Fourier 변환 응용을 기반으로 한다. 이상적인 전력시스템의 첫 번째 고조파는 60[Hz]이다. 다음차수의 고조파는 비선형 부하상태에서 존재하며, 전압과 전류파형의 왜곡으로 나타내며 Fourier 변환을 사용하여 쉽게 분석할 수 있다.

2.2.2 고조파차수

전압강하에 따른 유도전동기의 속도 및 출력전류에 영향을 미치는 고조파를 분석하기에는 유도전동기의 등가회로에서 찾을 수 있다.

또한, 고조파성분을 분석하기 위한 일반적인 방법으로는 시간 영역 안에 저장된 샘플 데이터 파형의 고조파성분을 마이크로프로세서를 이용하여 디지털적으로 계산한 오프라인 모드가 있다. 고조파 크기의 계산을 하는 일반적인 방법과 위상각의 샘플구간 파형을 DFT (Discrete Fourier Transform)으로 식(3)과 같이 나타낸다.

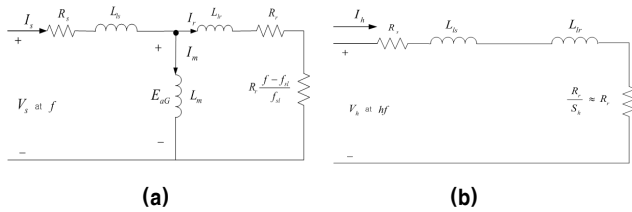
$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-j2\pi kn/N}, k=0,1,2,\dots,N-1$$

$$f_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{j2\pi kn/N}, k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

여기서, F : n 차 고조파의 Fourier, f : k 번째 샘플의 데이터 포인트, N : 60Hz 마다 샘플 전체 수, n : 고조파 계수, k : 데이터 포인트 계수

2.2.3 고조파 차수의 유도전동기 등가회로 [3~4]

유도전동기의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낸다. 유도전동기의 고정자와 회전자에 등가회로를 하나의 등가회로로 나타낸 그림3(b)에 흐르는 전류를 중첩의원리를 이용하여 구해진다.

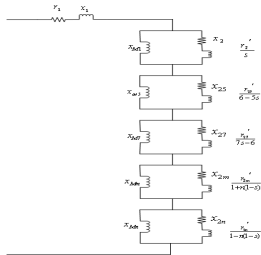


〈그림 3〉 유도전동기 등가회로

전류성분의 기본파와 고조파 전류를 구하기 위하여 고조파h, 자속에 의한 회전자 전압 V_{ah}, V_{bh}, V_{ch} 와 공극자속에 의한 속도 $w_{sh} = hw_s$ 로 나타낸다. 공극자속에 의해 생성된 고조파h = 6n-1(n=1,2,3,4...)로 기본파와 비교하여 쉽게 구해진다. 회전자 자속은 생성된 고조파h와 회전자 슬립에 의해 정해진다. 회전자 슬립 S_h 는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$S_h = \frac{w_{sh} \pm w_r}{w_{sh}} = \frac{(h \mp 1) \pm S_1}{h} \approx 1 \quad (4)$$

식(4)에서 $w_r/w_s = 1-s$ 이므로 $S_h=1$ 임을 알 수 있다. 여기서 \mp 는 정,역방향의 회전자 자속을 나타내며, S_1 는 0~1사이의 값을 가진다. 전압강하에 의해 발생한 고조파 차수의 변화에 따른 유도전동기의 등가회로는 작은 슬립으로 운전하는 경우는 자속분포의 고조파는 운전특성에 영향이 작아 무시하여도 되지만 슬립이 큰 경우 자속분포의 고조파에 의하여 발생하는 변화는 무시할 수가 없다. 식(4)에서 알 수 있듯이 제n차까지의 공간고조파자속을 고려한 3상유도전동기의 등가회로를 그림 4에 나타낸다. 공극자속분포에는 우수고조파가 존재하지 않는다. 또, 3상권선의 경우는 3배수의 고조파는 존재하지 않게 되어 고조파 차수 $h=6n-1(n=1,2,3,4 \dots)$ 이 된다.



〈그림 4〉 고조파 차수 유도전동기 등가회로

그림 4의 각 2차저항의 분모는 각 고조파의 회전자계에 대응하는 회전자 슬립으로 되어 계산되어진다. 또한, Fourier급수로 기본파분과 다수의 고조파분으로 분해 할 수 있다.

그림 4에서 $nX_n \rightarrow \infty, (nX_s + X_r) \gg (R_s + R_r)$ 이면 고조파 전류는 식 (5)와 같이 된다.

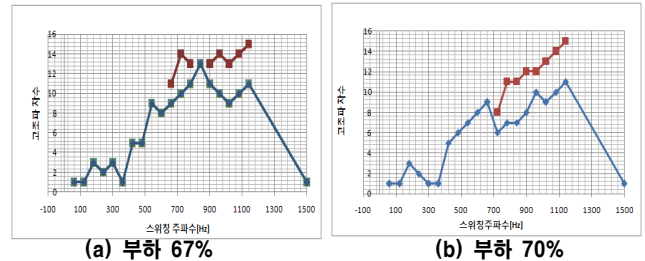
$$I_n = \frac{V_n}{n(X_s + X_r)} \quad (5)$$

$$I_h = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=5,7,\dots} I_n^2}$$

고조파 전류 I_h 는 주파수 증가에 따라 증가하며 고조파 전압이 컨버터 전압에 영향을 주면(스위칭 주파수 증가에 의한 영향) 고조파 전류의 진폭은 감소한다.

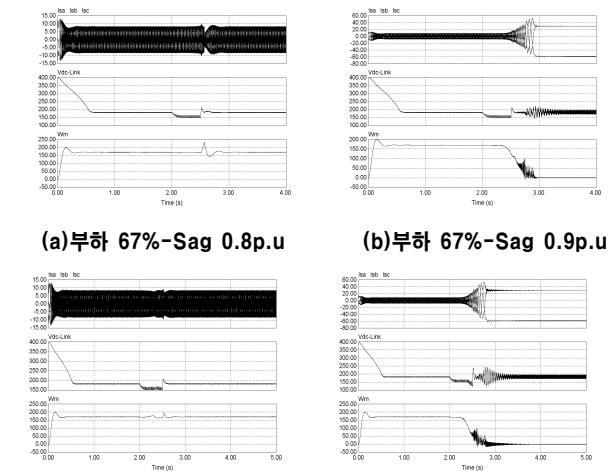
3. 결 론

Sag에 의한 영향으로 유도전동기의 인버터 출력전류 고조파차수의 변화를 그림 5에 나타내었다. 3상 220[V]중 2상Sag 입력전압 0.5~0.9[p.u], Sag시간 1sec, 유도전동기4극, 부하10[N.m]중 67%~70%부하운전, 스위칭주파수 60~20[kHz]범위에서 변화를 주었으며 인버터 출력 필터는 1[kHz]로 하였을 때 고조파 차수 변화를 그림 5(a)(b)에 나타내었다.



(a) 부하 67% (b) 부하 70%
〈그림 5〉 입력전압 Sag 및 스위칭 주파수 변화에 따른 인버터 출력전류 고조파 차수변화

스위칭주파수 1.2[kHz]를 넘는 범위에서는 기본파전류만 나타났으며, 부하의 증가와 스위칭 주파수의 증가에 따라 고조파차수의 변화가 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 Sag 발생시 부하의 증가에 따른 인버터 출력전류 i_a, i_b, i_c , DC-Link 전압, 유도전동기 속도(w_m) 변화량을 나타낸다. 이때 스위칭주파수는 1[kHz], Sag 시간은 0.5sec, 67%~70%부하를 증가 할 경우 각각의 파형을 나타낸다.



(c)부하 70%-Sag 0.4p.u (d)부하 70%- Sag 0.5p.u
〈그림 6〉 부하 증가에 따른 Sag 전압의 영향(Sag 시간 0.5sec)

3상 220[V]중 1상Sag의 입력전압 0.5~0.9[p.u], Sag시간 0.1~10sec, 유도전동기4극, 부하10[N.m]중 70%일 경우 유도전동기의 속도와 출력전류에 영향을 주지 않았으며, DC-Link 전압에는 영향을 주었다. 유도전동기의 스위칭주파수와 Sag전압강하는 스위칭주파수를 저속 운전일 경우 고조파의 영향이 많았으며, Sag의 영향에 유도전동기가 민감하게 동작함을 알 수 있었다. 또한, 스위칭 주파수가 높을수록 고조파의 영향과 Sag의 영향에 강인함을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] F. Corcoles, J. Pedra "Algorithm for the Study of Voltage Sags on Induction Machines"IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, December 1999.
- [2] ITC(CBEMA) Curve, www.itic.org
- [3] R. Ueda, T. Sonada, K. Koga and M. Ichikawa, Stability analysis in induction motor driven V/f controlled general-purpose inverter, IEEE Trans. Ind. Appl. 28, pp. 472 - 481.1992.
- [4] Lee-Hun Kim, Gi-Su Choi " Output filter design for conducted EMI reduction of PWM Inverter-fed Induction Motor System", IEEE ICPE, Oct, pp. 761-767, 2001.