

유도형 리니어 모터를 구동하는 PWM 인버터의 고조파 분석 및 역률과 효율측정

장석명*, 이성래*, 정상섭*, 박영태**, 정락교***
 *충남대학교 전기공학과, **한국 표준 과학 연구원, ***한국 철도기술 연구원

Harmonics Analysis, Power Factor and Efficiency Measurement of PWM Inverter for Linear Induction Motor Drive

S.M.Jang*, S.L.Lee*, S.S.Jeong*, Y.T.Park**, L.G.Jeong***
 *Chungnam Nat'l Univ, **KRISS, ***KRRI

Abstract - Linear Induction Motor is driven by inverter for speed control. Inverter contains many harmonics that was generated when the circuits is switching for a energy conversion. This harmonics is injurious, and harmful on the operational efficiency of motors. In this paper, it is certified the efficiency and power factor of LIMs and inverters in consideration with harmonics.

시켜 공급을 해야 한다. 이를 가변전압 가변주파수(VVVF) 운전이라고 하며, 이를 위하여 그림1과 같은 개념의 VVVF형 인버터로 사용하게 된다.

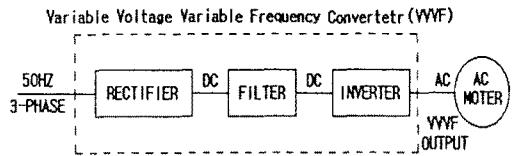


그림 1 LIM의 인버터 운전모델

1. 서 론

최근 유도형 모터의 구동 및 속도 제어에 인버터를 사용하는 경우가 대부분이다. 그런데 인버터의 원리상 시스템에는 상당량의 고조파가 포함되게 된다. 이 고조파는 모터의 효율을 감소시키고 역률을 저하시키며 온도를 상승시키는 등의 악영향을 미치게 된다. 따라서 모터의 특성해석 및 효율운전을 위해서는 고조파특성을 파악하고 구동시스템에 미칠수 있는 영향을 명확히 규명하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 유도형 리니어모터(이하 LIM)를 구동하는 인버터 시스템에 대한 각종 특성을 측정하여 분석하였다. 인버터 시스템의 변환효율을 측정하기 위해서는 인버터 내부회로 각각의 주요부분에 대한 측정이 필수적이다. 즉 인버터 입/출력부, 모터의 입/출력부 등으로 나누어 그 각각에 대한 특성들을 2전력계법과 3전력계법 각 각으로 측정하여 검토하였다. 이로써 LIM을 운전하는 PWM형 인버터의 고조파분석 및 이와 관련한 모터의 역률 및 효율특성을 분석검토하여 파악하므로써 시스템의 효율화운전을 위한 기본을 확립하였다.

2.1.2 인버터 출력 전압

그림.2는 인버터와 LIM이 연결된 구동시스템이다. 이러한 PWM 인버터는 고조파가 원리적으로 발생하게 되므로 고조파특성을 파악하기 위해서는 파형의 검토가 필요하다.

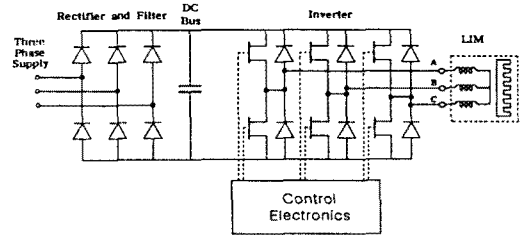


그림 2 인버터의 주회로 구성

2. 본 론

2.1 LIM의 인버터 운전

2.1.1 LIM의 운전모델

원래 LIM의 운전에서 속도는 입력주파수를 가변시켜 제어를 하게된다. 그러나 가속시에는 일정 크기의 추력으로 가속을 해야 만 한다. 그런데 추력은 식(1)과 같이 표현된다. 즉

$$F = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{\tau} N_1 k_{\omega 1} \Phi I_2 \cos \phi_2 \quad (1)$$

즉 Φ , I_2 , $\cos \phi_2$ 가 일정하다면 발생추력은 일정하다. 식(1)에서 1차측 기자력은 E_1 , 1차측에서 본 2차측 전류는 I_2 , sE_1 과 I_2 사이의 각 ϕ_2 는 상수이다. 또한 자속 Φ 는 식(2)에서처럼 입력전압과 주파수의 비에 비례하게 된다. 즉 V/f 에 일정값에 비례한다.

$$\Phi = f \left(\frac{V}{f} \right) \quad (2)$$

따라서 속도를 제어하기 위하여 주파수가 가변되더라도 공극자속이 일정하려면, 동시에 전압도 일정비로 가변을

인버터의 출력 상전압은 푸리에 급수에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{1A0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} V_{mn} \cos(n\omega t) \quad (3)$$

$$v_{1B0} = v_{1A0} \angle -120^\circ \quad (4)$$

$$v_{1C0} = v_{1A0} \angle +120^\circ \quad (5)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$ 는 입력각주파수, n 는 시간고조파 차수이다. 따라서 선간 전압은 다음 식(6)(7)(8)과 같다.

$$v_{1AB} = \sqrt{3} \left\{ V_{m1} \cos(\omega t + 30^\circ) - \sum_{n=5,7,11}^{\infty} V_{mn} \cos[n(\omega t + 30^\circ)] \right\} \quad (6)$$

$$v_{1BC} = v_{1AB} \angle -120^\circ \quad (7)$$

$$v_{1CA} = v_{1AB} \angle +120^\circ \quad (8)$$

Y-결선된 LIM에 입력되는 인버터 출력전압의 선간전압 파형 V_{1AB} , V_{1BC} 그리고 V_{1CA} 는 홀수차 고조파 $n = 6k \pm 1$ 을 포함한다. 여기서 $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 이다.

2.1.3 왜형된 출력파형과 역률

왜곡되지 않은 파형에서의 역률은 단지 $\cos \phi$ 이다. 즉 $\cos \phi$ 에서 ϕ 는 전압과 전류 파형 사이의 위상차이다. 그런데 만약 전류파형이 왜곡되었을 때에는 전압과 전류의 기본파 성분이 동상이므로 $\cos \phi = 1$ 이다. 하지만 실역률(True Power Factor)는 단위역률 1보다 적을 것이다. 따라서 실역률은 W/VA로 계산되며 이는 왜형된 파형이 고려되어진다.

$$PF = \frac{Watt}{V_{rms} \times I_{rms}} = k_d \cos \phi \quad (9)$$

여기서 $\cos \phi$ 는 기본파 전압과 전류의 위상차이며 k_d 는 다음 식(10)과 같다.

$$k_d = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \quad (10)$$

2.2 인버터 운전

인버터는 기본원리상 필연적으로 고조파를 함유하게 되어 모터의 성능을 전적으로 결정하게 된다. 즉 모터는 공급전원의 기본파성분에 의하여 주성능이 결정되며, 고주파에 의하여 과열, 진동, 소음, 역률저하 등이 발생하여 모터에 악영향을 주게된다. 그런데 기본파 및 고조파차수별 스펙트럼은 인버터의 제작법에 따라 그 정도가 다르므로 동일정격의 인버터라 하더라도 모터의 특성에 미치는 영향과 운전성능이 크게 다르다. 아직까지는 고조파에 대한 대책 및 모터자체의 성능에의 영향의 측정 및 이에 대한 대책이 매우 미흡하다.

2.3 고조파 분석 및 역률과 효율 측정

본 논문에서는 LIM을 무부하와 부하 운전으로 나누어 시험을 수행하여 이를 비교검토하였다. 또한 전력측정은 2전력계법과 3전력계법으로 수행되었다.

2.3.1 인버터 및 LIM사양

특성을 측정하기 위한 인버터 사양 및 LIM 사양은 표.1, 표.2와 같다. 인버터는 국내 K사제품의 VVVF 전압형 PWM 인버터이다.

표 1. 인버터 사양

입 력	상 수	3상
	정격 전압	200~230V
출 력	정격 주파수	50/60 Hz
	정격 출력	5.5kW
	허용 전류	24A

표.2 시험에 사용된 LIM사양

상 수	3	코일 직경	1mm
극 수	6	슬롯 간격	23mm
극 간 격	65mm	치 폭	11mm
코일 간격	45mm	슬롯 폭	12mm
병렬회로수	2		

2.3.2 계측시스템 구성 및 시험방법

그림 3은 인버터와 LIM의 효율을 측정하기 위하여 행하여진 실험의 구성도이다. 실험에는 인버터와 LIM, 전력분석기, DC발전기, 240W 20Ω의 저항부하가 사용되었다. 전압형 PWM인버터로 운전되는 LIM의 효율 및 역률특성을 정밀하게 측정하기 위해서는 인버터 자체가 가지고 있는 효율을 자세히 파악하는 것이 중요하다. 그

림 4는 인버터와 LIM의 효율 및 역률을 측정해 나가는 과정을 간략히 표현한다.

인버터의 효율은 인버터 입력단 전력과 DC-Bus단 전력의 효율과 DC-Bus와 인버터 출력단 효율을 측정하게 된다. 이로부터 인버터의 전체 효율을 다음과 같은 과정을 통하여 산출한다.

$$\begin{aligned} \text{DC전류효율(인버터 입력단과 DC-Bus단 사이)}[\%] \\ = \frac{\text{DC-Bus 단에서 측정된 전력}}{\text{인버터 입력단에서 측정된 전력}} \times 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PWM제어효율(DC-bus단과 인버터 출력단 사이)}[\%] \\ = \frac{\text{인버터 출력단에서 측정된 전력}}{\text{DC-Bus 단에서 측정된 전력}} \times 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{인버터 전체 효율}[\%] \\ = \frac{\text{입력 효율} \times \text{출력 효율}}{100} \end{aligned}$$

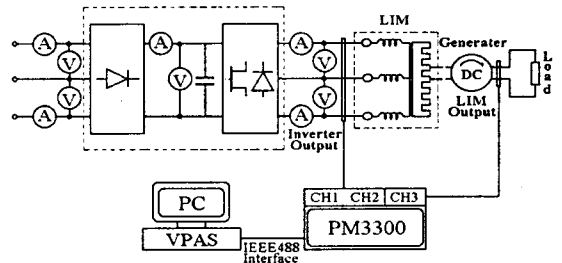


그림 3. 인버터와 LIM의 효율 측정 계측 구성도

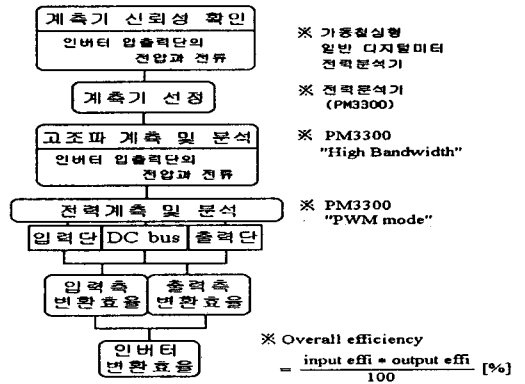


그림 4. 인버터 고조파 분석 및 역률과 효율을 측정하기 위한 흐름도

2.3.3 고조파 분석과 출력파형의 모델링

그림 5은 전력분석기에서 계측한 출력 전압과 전류의 왜형률(Distortion Factor : DF)이다. 이때의 운전조건은 LIM을 60Hz까지 V/f비 일정으로 운전하고 60Hz 이상에서는 220(V)의 일정전압에서 주파수만을 가변시켰다. 여기서 왜형율은 식(10)에서처럼 전체 실효치에 대한 기본파 실효치의 비이다. 이 그림을 통하여 인버터의 출력전압은 저주파수 영역에서 왜형률이 크고, 전류의 경우 거의 정현파에 가깝게 출력됨을 알 수 있다.

그림 6은 전력분석기에서 계측된 고조파 스펙트럼을 고조파 합성 프로그램에 입력결과 파형이다. 이 파형은 출력 전압파형으로 21차 고조파까지 고려하였으며, 기본파 실효치를 1로 기준하여 각 차수의 고조파를 입력하였다. 이를 통해 실제 인버터 출력파형은 수학적으로 모델링할 수 있었으며, 그림 5의 결과와 마찬가지로 저주파수 영역에서 파형의 일그러짐이 큼을 알 수 있다.

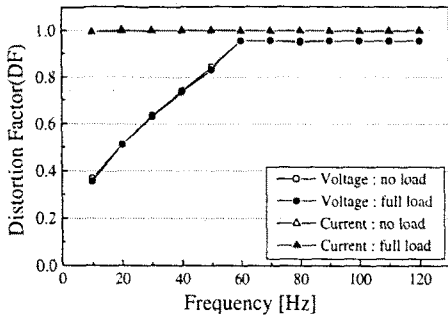


그림 5. 인버터 출력 전압의 모델링

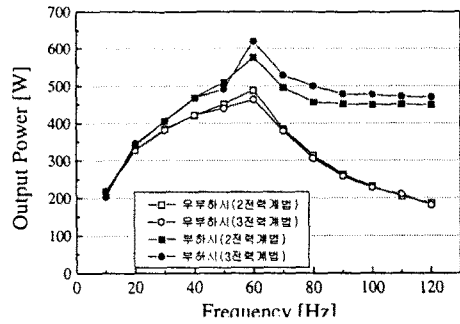
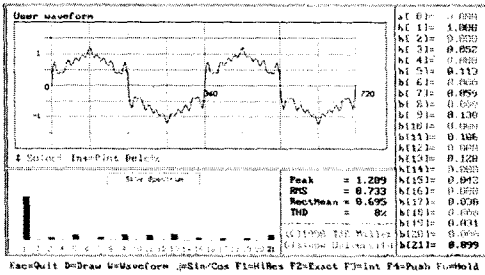
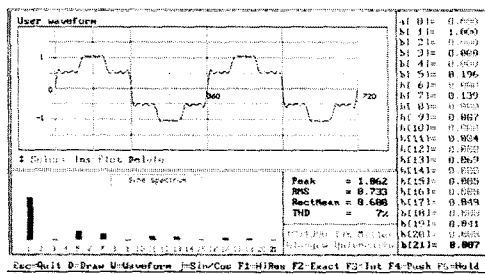


그림 7. 인버터 출력주파수에 따른 전력



(a) 출력주파수 = 10Hz



(b) 출력주파수 = 60Hz

그림 6. 인버터 출력 전압의 모델링

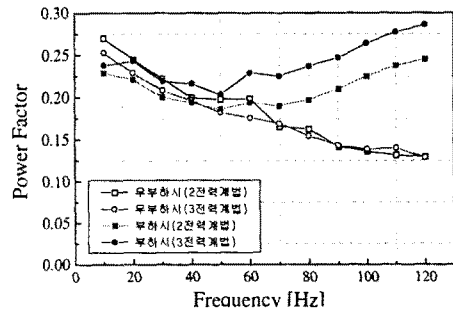


그림 8. 인버터 출력주파수에 따른 실역률의 변화

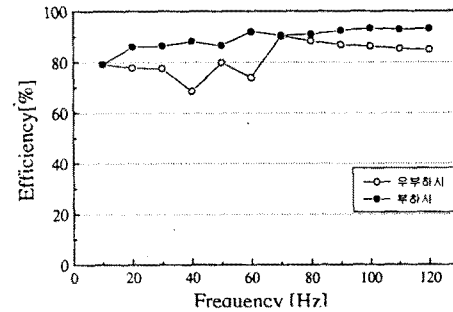


그림 9. 출력주파수에 따른 PWM 제어효율

2.3.4 출력주파수에 따른 전력 및 역률 특성

그림 7은 LIM의 부하인 DC발전기를 연결한 경우와 무부하운전을 하는 경우의 출력주파수에 따른 전력변화를 2전력계법과 3전력계법에 의하여 각각 측정 한 것이다. 이때의 운전조건은 $V/f=220/60$ 로 60Hz이상에서는 220[V]의 일정전압이 출력된다.

주파수가 증가함에 따라 효율은 상승하지만, 임계주파수인 60Hz이상에서는 부하가 연결된 경우는 주파수가 높아져도 92%정도로 일정하였다. 그러나 무부하시는 주파수 상승과 반대로 전력값은 큰 폭으로 감소하였다. 또한 2전력계법과 3전력계법에 의한 차이도 부하시에는 꽤 큼을 볼 수 있다. 이는 전력측정시 일반적으로 2전력계법이 적용되지만 역률이 변하는 경우는 3전력계법이 적용되어야 한다는 사실에 부합이 된다.

그림 8은 LIM의 부하시와 무부하시의 역률특성을 측정한 자료이다. 역시 임계 출력주파수 60Hz를 기점으로 저주파 영역에서는 역률이 감소하지만 그 이상에서는 부하시 역률이 오히려 증가하고 무부하시에는 감소하였다.

2.3.5 인버터의 변환효율

그림 9는 PWM 인버터의 DC-Bus단과 출력단 사이의 변환효율을 보여주고 있다. 전체적으로 변환효율은 인버터의 출력주파수, 즉 모터의 속도의 증가에 따라 상승하는 것을 볼 수 있다. 특히 부하를 연결하였을 경우가 그렇지 않은 경우보다 효율이 더 개선됨을 볼 수 있다.

3. 결 론

LIM의 가변 속도제어를 위해 사용되는 인버터를 사용하면 고조파가 함유되었을 경우 자체의 효율 뿐만아니라 모터의 운전에 미치는 영향 또한 무시할 수 없다. 본 논문에서는 출력전압과 전류의 고조파 분석 및 인버팅 회로의 효율을 측정하여 검토하였다. 또한 주파수 조건에 따른 전력값과 역률의 측정 및 검토를 통하여 인버터가 LIM 특성에 미치는 영향도 볼 수 있었다. 앞으로 LIM의 구동시스템 전체에 걸친 특성을 좀더 다양한 측면에서 정밀하게 검토하고자 한다.

(참고 문헌)

- [1]장석명, 정상섭, 박영태, "유도형 모터 구동용 인버터의 고조파 파형 분석과 효율측정" 대한 전기학회 하계논문집(A), 1997, pp.282~284
- [2]장석명의, "시간고조파를 함유하는 비정현파 전력에너지의 정밀계측을 위한 연구", 대한 전기학회, 제45권 제11호, pp.1542-1548

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910-060-2로 지원되어 수행된 연구결과의 일부입니다.