

새로운 고조파 토오크 평가함수에 의한 Trapezoidal PWM 인버터의 평가

이치환, 구본호, 권우현

경북대학교 전자공학과

Evaluation of Trapezoidal PWM Inverter using a new Harmonic Torque Factor

Chi Hwan Lee, Bon Ho Koo, Wu Hyun Kwon

Dept. of Electronics, Kyungpook National University

역동을 조사하고, HTF가 타당함을 확인 하였다.

ABSTRACT

In this paper, a new Harmonic Torque Factor (HTF) that represents torque ripple of induction motor is proposed.

Trapezoidal PWM is analyzed to torque ripple by HTF and then we obtain optimum triangular factor at some carrier ratio.

Six-step, sinusoidal PWM and Trapezoidal PWM are compared and evaluated for choosing a good control strategy of PWM inverter. It turns out that six-step inverter is better than sinusoidal PWM and Trapezoidal PWM when their carrier ratio is 9, and Trapezoidal PWM is superior to sinusoidal PWM.

At induction motor is driven by PWM inverter, torque ripples are investigated by computer simulation using d-q two axis model.

It is proved that a new Harmonic Torque Factor is valid.

1. 서론

전력용 반도체소자의 발달로, 직류전동기를 대신하는 가변속 유도전동기 시스템이 많이 이용되고 있다. 과거, 가변속운전을 위한 인버터는 Thyristor의 스위칭특성으로 Six-step이 일반적으로 사용되어 왔으나, 최근의 고속전력소자의 개발로 Six-step의 단점을 보완한 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터가 사용되고 있다. 현재 많이 이용되는 Sinusoidal PWM(SPWM)에 관하여 많은 연구가 되었으며, Modulation Model로 부터 Double fourier series하였다. PWM에서의 고조파는 Six-step에 비해 높은 차수의 고조파가 발생되고, Carrier Ratio에 따라 고조파의 크기, 차수가 변화하며, 여러가지 PWM Strategies의 평가를 위한 PWM 평가함수가 제안되었다.

Microprocessor의 발달로 sine함수를 사용하지 않는 Trapezoidal PWM(TPWM)이 1983년 Varnovitsku의 의해 제안, 구현되었고, Taniguchi와 Irie는 수학적 해석과 PWM을 위한 최적의 Trapezoidal waveform의 삼각인수를 제안하였다. 그러나 전동기의 특성과 Carrier Ratio의 변경에 대한 삼각인수를 구하지 못하였다.

본 논문은 PWM인버터로 구동되는 유도전동기의 토오크 역동을 표시할 수 있는 새로운 고조파 토오크 평가함수를 정의하고 TPWM에서 최소 토오크 역동의 삼각인수를 구하였다.

Six-step, SPWM과 함께 비교, 평가 하였으며 d-q model을 이용한 Computer simulation으로 토오크

2. Voltage Source Trapezoidal PWM

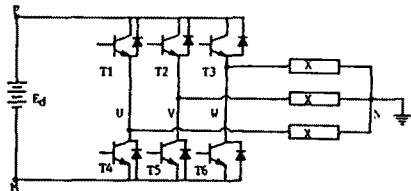


Fig. 1. Basic Circuit of Two-Level PWM Inverter.

그림 1처럼 3상 인버터는 6개의 스위칭소자로 구성되며, 스위칭순서의 조합으로 DC-to-AC를 얻는다. Switching law를 결정하기 위하여 삼각파와 Trapezoidal파를 비교한다.

Trapezoidal wave는 그림 2에 나타나 있고 삼각파에서 진폭을 limiting하여 발생시킬 수 있다. 이때

$$\sigma = E_s / E_{sm} \text{ : Triangular factor} \quad (1)$$

$$M_t = E_{sm} / E_c \quad (2)$$

$$M = M_t \cdot \sigma \quad (3)$$

로 정의한다. 최대치의 직선부분에 가지는 ϕ 는 σ 의 함수이며 다음의 관계가 있다.

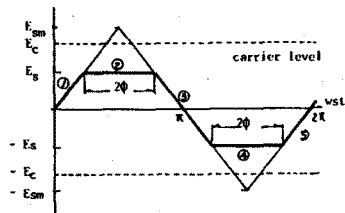


Fig. 2. Trapezoidal modulating signal.

$$\phi = (1 - \sigma) \pi / 2 \quad (4)$$

TPWM의 Modulation Model은 그림3과 같다. 여기서 축 X는 반송파, Y는 변조파의 진행방향이며, 직선 9와의 교차점이 sampling phase angle ϕ_1, ϕ_2 가 된다. 그림2에서 표시된 5구간으로 나누어 phase angle을 표시한다. Phase U의 pole 전압 V_{um} 은 $V_{um}(wct, wst)$

$$= \sum_{n=1}^{10} \sum_{n=0}^{2\pi} K_{mn} \cdot \exp[j(mwct + nwst)] \quad (5)$$

로 표현되며, 시간전압은 pole 전압의 vector 합이므로 시간전압을 구하기 위하여

$$\lambda_n = [(1 - (-1)^n) \cdot \cos(n\pi/6) - j(1 + (-1)^n) \cdot \sin(n\pi/6)] \cdot \exp(jn\pi/6) \quad (6)$$

을 정의한다. 그러므로 시간전압 V_{uv} 는

$$V_{uv} = \text{Re} [\lambda_n \cdot V_{um}] \quad (7)$$

으로 표현된다. K_{mn} 은 아래식을 이용해 구할 수 있다.

$$K_{mn} = \frac{Ed}{(2\pi)^2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_0^{2\pi} \exp(-j(mx + ny)) \, dx \, dy \quad (8)$$

$x = wct, y = wst$

CR(Carrie Ratio)는 3의 배수이면서 출수를 선택하여야 한다. 이조건이 만족되지 않으면 DC가 포함된 짝수 고조파가 발생되고, CROI 낮을수록 DC 성분의 비가 커진다. 기본파 및 고조파의 크기는 σ 에 따라 변화되므로 σ 의 선정이 매우 중요하다.

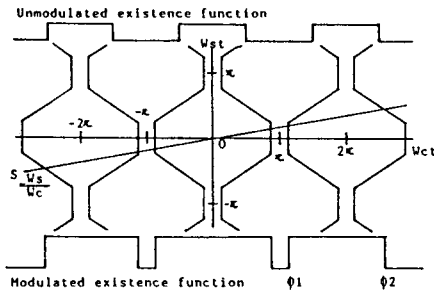


Fig. 3. Modulation Model for Trapezoidal PWM pulse trains.

3. 고조파 토오크 평가합수 : HTF (Harmonic Torque Factor)

고조파전류는 유도전동기에서 잘, 역회전의 고조파 MMF를 발생시키게되고 이는 토오크요동을 일으킨다. 그림4는 5, 7차 고조파를 phasor로 나타낸 것이다. 고조파에대한 유도전동기의 slip은 1로 가정할 수 있고, 회전자의 고조파전류는 리액턴스가 상승하므로 전압에 대해 $\pi/2$ lag 되고, 고정자 전압에 대해 $3\pi/2$ lag 된다. 지속 ϕ_m 은 V_1 보다 $\pi/2$ lag 된다고 가정하면 a)와 같다. b)는 기본파 지속 ϕ_m 을 stationary로

두고 관찰한 것으로 5, 7차의 MMF는 $-6 We, +6 We$ 로 회전한다. 이때 발생하는 6차 고조파토오크는 각 성분의 중첩으로 주어지며, 고조파자속을 무시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_6 &= K\phi_m \cdot (15r \sin(\theta_5 - 6Wet) + 17r \sin(\theta_7 + 6Wet)) \\ &= K\phi_m \sqrt{(17r \cos(\theta_7) - 15r \cos(\theta_5))^2 + (17r \sin(\theta_7) + 15r \sin(\theta_5))^2} \cdot \sin(6Wet + \theta) \quad (9) \end{aligned}$$

그러므로 평가합수를 정의하면

$$\begin{aligned} HTF &= \sum_{n=3,6,\dots}^{\infty} \sqrt{\left(\frac{V_{n+1}}{n+1} \cos(\theta_{n+1}) - \frac{V_{n-1}}{n-1} \cos(\theta_{n-1})\right)^2 + \left(\frac{V_{n+1}}{n+1} \sin(\theta_{n+1}) + \frac{V_{n-1}}{n-1} \sin(\theta_{n-1})\right)^2} / V_1 \quad (10) \end{aligned}$$

으로 정의할 수 있다.

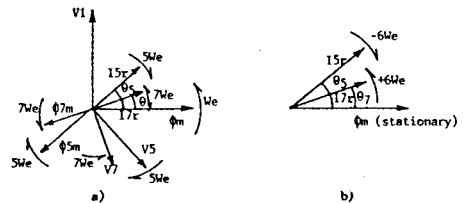


Fig. 4. Phasor Diagrams for sixth harmonic torque.

고조파전류로인해 발생하는 지향손실은 전류의 제곱에 비례하므로

Harmonic Loss Factor

$$HLF = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n} \right)^2 / V_1 \quad (11)$$

으로 표현할 수 있다.

HTF를 TPWM에 적용하여 σ 의 변경에 따른 최소치를 구하면 최적의 σ 가 얻어진다. 표1의 TPWM에서 제시된 σ 의 수치는 HTF의 최소점이다.

THD(Total Harmonic Distortion), HLF, HTF를 이용하여 Six-step, SPWM, TPWM에 대해 계산하면 표1과 같다. Six-step을 기준으로 토오크요동을 비교하면 SPWM은 CR=330이상에서 감소되며, CR=9는 4배의 역동을 가지게된다. TPWM은 CR=150이상에서 감소된다.

SPWM, TPWM에서 CR=9는 HTF, HLF 모두 Six-step에 비해 나쁜 결과를 가진다. DC-link 전압의 활용은 SPWMI 0.87, TPWMI 1.05 ($\sigma=0.35$)로 TPWMI 우수하다.

4. Simulation

농형유도전동기의 d-q model를 이용하여 simulation한다. 3상 고정자의 phase 전압 V_a, V_b, V_c 는 PWM 인버터의 pole 전압과 다음의 관계가 있다. (그림1 참조)

6.참고 문헌

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Um} \\ V_{Vm} \\ V_{Wm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

simulation의 결과를 그림5에 나타내었다. HTF로서 여측된, CR=9일때 SPWM의 토오크역동이 Six-step보다 약4배의 역동이 됨을 확인할수 있다.

5.결론

본 논문은 새로운 고조파 토오크 평가함수를 정의 하였으며, Trapezoidal PWM에서 최적의 Triangular Factor θ 를 결정하였다.

Six-step, SPWM과의 비교에서 다음의 결과를 얻었다.

- 1) CR=9이하는 Six-step이 우수하다.
- 2) SPWM의 토오크 역동은 CR=33이상에서 Six-step보다 개선된다.
- 3) TPWM은 CR=15에서 SPWM CR=33보다 좋은 토오크 특성을 가진다.
- 4) 고조파전류의 Distortion은 SPWM,TPWM이 비슷한 특성을 가진다.

TPWM이 SPWM보다 우수하며, d-q model에서의 simulation의 결과로서 HTF의 타당성이 확인되었다.

Table 1. Comparison of Six-Step, SPWM and Trapezoidal PWM by THD, HLF and HTF.

Classification	(T H D)		(H L F)		(H T F)	
	Total Harmonic Distortion %	1/six-step	Harmonic Loss Factor e-4	1/six-step	Harmonic Torque Factor e-3	1/six-step
Six - Step	31	1.00	26.0	1.00	23	1.00
CR = 9	63	2.03	28.0	1.17	95	4.13
CR = 15	61	1.97	9.2	0.38	57	2.48
CR = 21	61	1.97	4.6	0.19	40	1.74
CR = 27	57	1.84	2.7	0.11	29	1.26
CR = 33	53	1.77	1.8	0.08	23	1.00
CR = 39	52	1.68	1.3	0.05	19	0.83
CR=9, $\theta=0.37$	46	1.48	26.0	1.08	29	1.26
CR=15, $\theta=0.35$	44	1.42	7.7	0.32	21	0.91
CR=21, $\theta=0.35$	43	1.39	4.0	0.17	13	0.56
CR=27, $\theta=0.35$	43	1.39	2.6	0.11	11	0.48
CR=33, $\theta=0.35$	41	1.32	1.9	0.08	9	0.39
CR=39, $\theta=0.36$	41	1.32	1.4	0.06	8	0.35

* CR = Carrier Ratio.

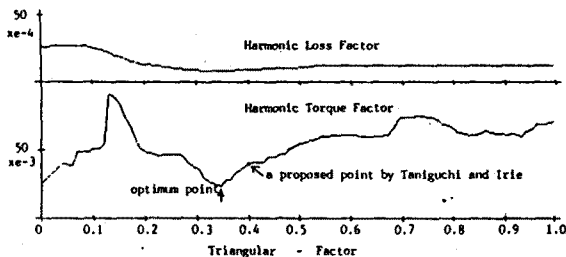


Fig. 6. HLF and HTF values in Trapezoidal PWM(CR=15) when θ is varying from 0 to 1.

- [1] J.M.D. Murphy, "A Comparison of PWM Strategies for Inverter-Fed Induction Motors", IEEE Trans., vol. IA-19, pp. 363-369, May, 1983.
- [2] Marlen Varnovitsky, "A Microcomputer-Based Control Signal Generator for a Three-Phase Switching Power Inverter", IEEE Trans., vol. IA-19, pp.228-234, March, 1983.
- [3] Maurizio Mezzucchelli, Giuseppe Sciutto, "PWM Systems in Power Converters: An Extension of the "Subharmonic" Method", IEEE Trans., vol. IECI-28, pp. 315-322, Nov. 1981.
- [4] P.C. Krause and C.H. Thomas, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans., vol. PAS-84, pp. 1038-1053, Nov. 1965.
- [5] Tung Hai Chin and Hideo Tomita, "The Principles of Eliminating Pulsating Torque in Current Source Inverter Induction Motor Systems", IEEE Trans., vol. IA-17, pp. 160-166, March, 1981.
- [6] Katsunori Taniguchi, Hisaichi Irie, "Trapezoidal Modulating Signal for Three-Phase PWM Inverter", IEEE Trans., vol. IE-33, pp.193-200, May, 1986.

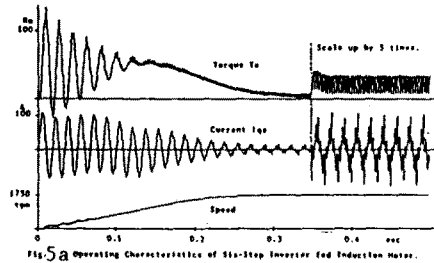


Fig.5a Operating Characteristics of Six-step Inverter Fed Induction Motor.

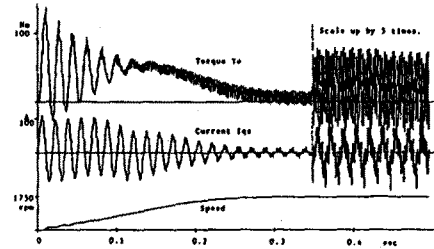


Fig.5b Operating Characteristics of SPWM(CR=9) Inverter Fed Induction Motor.

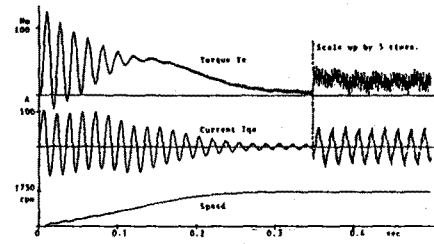


Fig.5c Operating Characteristics of SPWM(CR=33) Inverter Fed Induction Motor.