

인버터-유도전동기 구동시스템의 소음 저감을 위한 PWM 방식

서영민 이주훈 윤인식 박영진 홍순찬
단국대학교 전기공학과 원주대학 전기과

A PWM Strategy for Noise Reduction of Inverter-Induction Motor Drive System

Young-Min Seo, Ju-Hoon Lee, In-Sik Yoon, Young-Jeen Park, Soon-Chan Hong
Dankook University, Wonju National College

Abstract - In PWM inverter fed traction motor drive systems, the switching frequency is restricted and thus the electromagnetic acoustic noise is generated. To reduce such an audible noise, we propose the modified RSF(Randomized Switching Frequency)-PWM method. In the proposed RSF-PWM method, both triangular wave and sawtooth wave are used in one period as carrier waves. Because the proposed method has inherently the same property as sinusoidal PWM method, there is no problem of linearity. To verify the validity of the modified RSF-PWM method, computer simulations are carried out.

된 RSF-PWM을 제안한다. 또한 제안된 기법의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 행하여 SPWM 방식과 비교하여 소음 저감 효과를 확인한다.

2. 소음저감 기법

2.1 Deterministic PWM

인버터의 스위칭으로 인한 전자기적 가청 소음의 저감을 위하여 비동기식 SPWM, 히스테리시스 전류제어, SHE PWM 등 여러 가지 방법이 시도되어 왔다.

비동기식 SPWM 방식은 변조파(reference signal)인 정현파의 주기와 무관하게 일정한 주파수의 운송파(carrier signal)를 발생시켜 운전하는 방식이다. 이 방식은 변조파와 운송파의 비동기로 인하여 인버터 출력전압의 패턴이 매 주기 다르게 형성되는 결과를 얻을 수 있으나 결국 몇 주기 단위의 반복 패턴이 얻어지게 되어 지속적인 불규칙성은 얻을 수 없다.

히스테리시스 전류제어(Hysteresis current control) 방식은 전동기 부하조건에 따라, 즉 전류의 변화에 따라 불규칙적인 스위칭이 얻어지는 방식으로 근본적으로 랜덤 스위칭 패턴을 가진다. 그러나 정상상태의 스위칭 패턴은 스위칭 순간의 전류 편차와 직결되어 전체적으로 주기성을 가지게 되어 결국 부하 특성에 의존하는 가청소음을 발생시킨다.

SHE PWM 방식은 반송신호를 사용하지 않는 대표적인 PWM 방식으로 특정 고조파를 제거하는 스위칭 각을 미리 계산하고, 계산된 결과를 이용하여 스위칭하는 방식이다. 소음을 발생시킬 수 있는 특정 고조파를 제거하기 위한 스위칭 각을 구하려면 스위칭 각을 변수로 하는 연립방정식을 수치해석 방법으로 풀어야 하는데, 구하려는 스위칭 각의 개수가 많아지게 되면 계산량이 늘어나 실시간 제어가 어려운 방식이다.

이상에서 언급한 PWM 방식들은 실제로 소음 저감을 위하여 적용하고자 할 때 복잡하고 고가의 제어시스템이 요구되고, 몇 주기 단위의 지속적으로 반복되는 스위칭 패턴이 나타나게 된다. 이것은 결국 주기적인 전류 맥동을 형성하여 인버터의 소음을 증가시킨다. 이러한 문제는 스위칭주파수의 증가로 해결할 수 있지만 현실적으로 스위칭 소자의 스위칭 한계 때문에 적용이 어려워진다.

2.2 Random PWM

근래에 들어 인버터의 전자기적 소음을 줄이기 위한 기법으로 연구되고 있는 RPWM(Random PWM) 방식은 PWM에 의한 스위칭시 그 주파수를 랜덤하게 변화시켜 스위칭 주파수와 관계하여 발생하는 전압, 전류 및 소음 등에 대한 고조파 성분을 특정 주파수 대역이 아니라 광범위한 주파수 대역에 고루 분포되도록 하여 인간에게 정신적, 신체적 피로를 가중시키는 전자기적 가청 소음을 저감시킬 수 있다.^{(4)~(6)}

이러한 RPWM에는 스위칭 패턴을 결정하는 과정에 따라 랜덤 스위칭(RS: Random Switching) 방식, 랜덤 펄스위치(RPP: Randomized Pulse Position) 방

1. 서 론

수송수단의 대규모화, 고속화의 추세에 따라 선진 국가에서는 고속전철에 관한 연구와 실험이 활발히 이루어지고 있고, 우리의 경우에도 고속전철 사업이 진행되고 있어 수년 내에 고속화 시대를 맞이하게 되었다.

오늘날 고속전철과 같은 인간 생활의 편의를 위한 많은 도구와 시설들이 만들어 내는 소음 및 진동 공해는 일상생활 중에서 정신적, 신체적 피로를 가중시키고 삶의 질을 저해하는 요인으로 등장하여 심각한 문제를 야기하고 있다.

철도소음의 발생원인은 차륜과 레일 사이에서 발생하는 전동소음, 추진장치와 보조장치에서 발생하는 구동장치 소음, 높은 운행속도로 인하여 차체에서 공기역학적 메카니즘에 기인하여 발생하는 공력소음, 그리고 구조물과 지면을 통하여 전달되는 저주파소음 등이 있다.

유도전동기의 가변속운전을 위한 인버터 구동장치에서 일반적으로 사용하는 PWM 방식들은 스위칭을 결정하는 패턴의 형성과정이 고정 스위칭 주파수로 이루어져 인버터 출력전압이 매주기 동일 패턴이 반복되는 형태가 된다. 결국 특정주파수 대역에의 고조파 집중분포로 이어져 좁은 대역의 고주파 영역에서 사람에게 피로감을 줄 수 있는 전자기적 소음을 유발하게 된다.

근래에 들어서 전자기적 소음을 줄이기 위한 기법으로 스위칭 소자를 연속적으로 넓은 주파수 대역에서 스위칭하는 RPWM(Random PWM) 방식이 큰 주목을 받고 있다.⁽¹⁾ RPWM 방식은 전압, 전류 및 소음 등에 대한 고조파 성분을 특정 주파수 대역이 아니라 광범위한 주파수 대역에 고루 분포되도록 하여 소음을 저감시키는 방식이다.^{(2),(3)}

본 논문에서의 소음저감 대상은 철도차량의 구동에 사용되는 인버터로서 GTO를 스위칭 소자로 사용하므로 스위칭 주파수가 최대 450Hz로 제한된다. 기존의 랜덤 PWM 방식들은 높은 스위칭주파수를 필요로 하거나, 출력 기본파의 선형성 문제 때문에 대용량 인버터에 적용하기가 어렵다. 본 논문에서는 SPWM 방식을 근간으로 하는 RSF-PWM 방식으로부터 낮은 스위칭 주파수에서도 고조파의 광대역 분산효과를 얻을 수 있는 수정

식, 랜덤 스위칭주파수(RSF) 방식 등이 있다.

RS-PWM 방식은 랜덤 수를 운송파로, 평균 스위칭 함수를 변조파로 비교과정을 수행하여 스위칭 함수를 만족하는 스위칭 펄스 패턴을 만들어 가는 방법이다. 운송파로 랜덤 수를 사용하게 되어 매 구간에서의 펄스 배열을 불규칙하게 얻을 수 있으며, 그 결과 스위칭 주파수를 넓은 대역에 고루 분포시킬 수 있긴 하지만 랜덤 수의 발생빈도가 높아야 고조파 확산 효과가 크므로 결국 스위칭 주파수의 증가를 요하게 된다.

RPP-PWM 방식은 평균 스위칭함수로부터 얻어진 펄스 배열이 있을 때, 각 소구간에서의 펄스 배열을 좌측 또는 우측으로 랜덤하게 배열함으로써 전체적인 불규칙성을 얻는 방식으로 Lead-lag RPWM 방식이라고도 한다. 이 방법은 펄스 위치만을 랜덤화하므로 비교적 간단하게 구성할 수 있지만, 펄스의 배치가 좌측 또는 우측으로의 단순한 배열을 이루고 있어서 완전한 불규칙성의 효과는 그다지 크지 않다.

RSF-PWM은 RPWM의 가장 보편적인 방법으로서 SPWM의 수정된 형태로, SPWM 방식에서 사용하는 삼각 운송파의 주파수를 랜덤하게 발생시켜서 얻어지는 펄스의 불규칙성을 확보하는 PWM 방식이다. 이 방법은 보편적인 SPWM의 수정된 형태이므로 실제 구현이 쉬우며, 앞의 방법들과 비교할 때 진폭 변조지수 m_a 와 출력전압 변조지수 m_c 관계의 선형성이 비교적 우수하여 인버터의 출력 기본파 전압의 확보가 수월하다. 그러나 출력 한 주기 내의 삼각파 발생 빈도 수의 결정이 자유롭지 못하며 펄스 위치의 변동폭이 크지 못하여 SPWM의 고조파 분포 특성을 완전히 벗어나지 못하는 결과가 얻어진다.

2.3 수정된 RSF-PWM

기존의 RPWM 방식을 대용량 인버터에 적용하려면 스위칭주파수의 제한, 랜덤화 정도 등의 어려움이 많다. 따라서 본 논문에서는 대용량 인버터에 적용할 수 있는 기법으로 RSF-PWM 방식에서 운송파의 형태로 삼각파와 톱니파를 혼용하는 수정된 RSF-PWM 방식을 제안한다. 정현 변조파와 비교가 이루어질 때 삼각파뿐만 아니라 톱니파 기울기의 극성을 함께 랜덤하게 변화시킴으로써 펄스 위치의 변동폭을 확대시켜 펄스 위치의 랜덤화(RPP-PWM) 효과까지 얻을 수 있는 방법이며, 근본적으로 SPWM의 성질을 가지므로 출력 기본파 전압의 선형성 문제도 아울러 해결할 수 있다.

수정된 RSF-PWM을 설계하기 위하여 먼저 운송파인 삼각파와 톱니파의 주파수 범위를 GTO의 최대 스위칭 주파수인 450Hz를 고려하여 결정하여야 한다.

고조파의 광대역 분포효과를 얻으려면 스위칭 주파수의 가변 폭을 넓게 설정하는 것이 필요하다. GTO의 최대 스위칭주파수인 450Hz를 중심으로 적당한 주파수 범위를 설정해야 하는데, SPWM의 특성상 주파수 변조지수(m_f)가 21보다 큰 경우에 나타나는 고조파 분포특성은 거의 비슷하고, 또한 $m_f > 21$ 범위의 스위칭은 오히려 과도한 스위칭 손실을 가져올 수 있다. 따라서 최대 스위칭 주파수 $f_{sw} = 450\text{Hz}$ 일 때 $m_f = 21$ 이 얻어지는 출력 주파수 $f_o = 21.4\text{Hz}$ 인 점을 경계로 하여 $f_o = 0 \sim 21.4\text{Hz}$ 범위(영역 I)는 낮은 스위칭에 의한 스위칭 손실을 저감하기 위하여 일정 $m_f (= 21)$ 로 운전하도록 하였고, 고조파 분산효과를 얻을 수 있도록 가변 스위칭 범위는 $m_f = 21$ 의 $\pm 60\%$ 로 설정하여 $m_f = 8.4 \sim 33.6$ 의 값을 사용한다.

견인전동기 운전 주파수가 21.4Hz 이상의 영역에서는 주파수 변조지수 m_f 를 21보다 크게 하면 GTO의 최대 스위칭 주파수인 450Hz를 넘게 된다. 따라서 m_f 가 아닌 스위칭 주파수 f_{sw} 의 가변 범위를 설정하여야 한다. 일정 범위의 스위칭주파수($f_{sw} = 180 \sim 720\text{Hz}$) 운전 방식이 적용될 때 대응하는 m_f 의 변화를 얻는다.

견인용 유도전동기의 운전 주파수가 60Hz에 가까울 수록 인버터 출력전압의 크기는 $m_c \approx 1$ 이 되도록 PWM

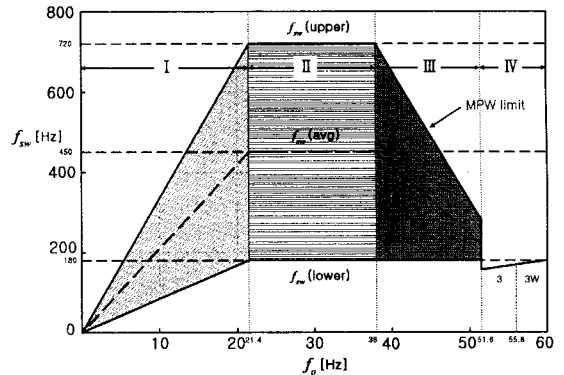
이 이루어져야 한다. 그러나 진폭 변조지수 m_a 가 $m_a \approx 1$ 의 크기에 이르면 삼각파와의 변조 과정에서 GTO의 턴오프 시간을 확보하기 어려운 정도의 notch가 발생한다. 따라서 스위칭 주파수의 범위를 설정할 때 GTO의 턴오프 시간을 안정적으로 확보하기 위하여 최소 펄스폭(MPW: Minimum Pulse Width)을 제한해야 한다. GTO의 일반적인 최소 펄스폭에 대한 사양은 $150\mu\text{s}$ 이지만, 본 논문에서는 안정한 스위칭 동작을 위하여 MPW를 $250\mu\text{s}$ 로 설정하였다.

MPW의 영향을 받는 출력주파수의 경계는 38Hz 이상의 영역이며, MPW를 고려한 스위칭주파수의 상한은 식(1)과 같이 얻을 수 있다. 그림 1은 운전주파수에 대한 스위칭주파수와 주파수 변조지수의 범위를 나타낸 것이다. MPW의 경계선은 출력주파수 $f_o = 31 \sim 51.6\text{Hz}$ 인 구간(영역 III)의 MPW limit 선으로 주어진다.

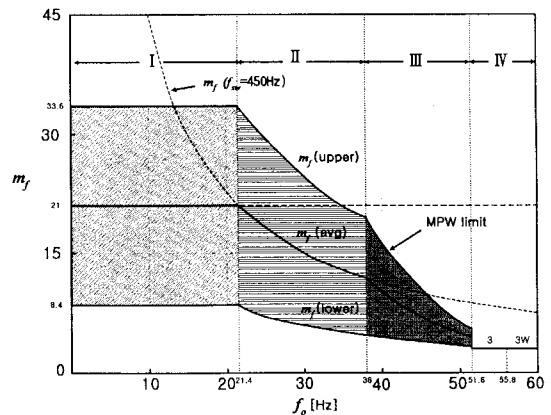
$$\text{MPW limit} = \frac{1 - \frac{f_o}{60 \times 0.99}}{2 \times \text{MPW}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

정토크 운전영역인 $f_o = 0 \sim 60\text{Hz}$ 중에서 운전 주파수가 $f_o = 40\text{Hz}$ 인 점에서 철도 차량의 운행속도가 100km/h를 넘어서게 되어 이때부터 철도소음의 발생원인 중에서 전동소음과 공력소음이 지배적으로 나타나게 되고 인버터 스위칭에 의한 전자기적 가청소음은 영향력이 약해진다.

따라서 견인전동기의 운전주파수가 $f_o = 0 \sim 50\text{Hz}$ 인 영역의 PWM 패턴만을 저소음을 위한 방식으로 구현하면 되므로 $f_o = 0 \sim 51.6\text{Hz}$ 인 영역(영역 I, II, III)은 RPWM 방



(a) $f_o - f_{sw}$ 관계



(b) $f_o - m_f$ 관계

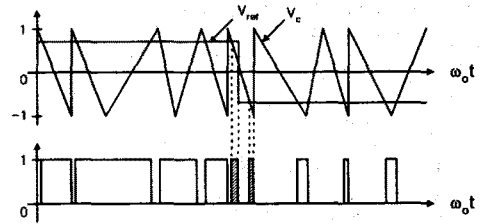
그림 1. 운전 주파수(f_o)에 대한 스위칭 주파수(f_{sw})와 주파수 변조지수(m_f)

식을 적용하고, $f_0 = 51.6 \sim 60\text{Hz}$ 인 영역(영역 IV)은 SPWM 방식을 적용하도록 한다.

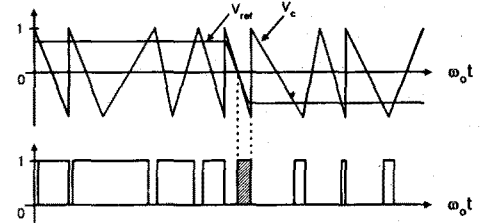
운전주파수 $f_0 = 45\text{Hz}$ 일 때 요구되는 인버터 출력 기본파 전압의 크기는 $m_c = 0.75$ 이며, 변조파로 정현파를 사용하면 정현파의 진폭 $m_a = 0.954$ 일 때 $m_c = 0.75$ 가 되므로 45Hz 이상의 운전주파수 영역에서 더 큰 전압을 확보하기 위해서는 $m_a > 1$ 인 과변조 동작이 있어야 한다. 그러나 RPWM 방식에서는 과변조가 일어날 때 펄스 위치의 불규칙성을 얻어낼 수 없으며, GTO의 안정적 스위칭을 위한 최소 펄스폭의 확보도 어려워진다.

일반적으로 SPWM에서 과변조 없이 인버터의 출력 기본파 전압의 증가를 위하여 변조파로 고조파가 주입된 정현파를 사용하는 HIPWM(Harmonic Injected PWM)이 사용되지만 HIPWM의 경우에도 $m_f = 5$ 인 경우를 제외한 나머지 경우는 $m_c \approx 0.9m_a$ 정도의 크기를 얻을 수 있을 뿐 여전히 큰 기본파 전압의 확보는 어려운 실정이다. 따라서 높은 기본파 전압의 확보가 가능한 $m_c = m_a$ 의 관계를 얻을 수 있는 새로운 변조 방식을 도입하여야 하는데, 구형파 변조방식을 사용하면 그림 2(b)와 같이 $m_a - m_c$ 관계가 거의 완전 비례 특성을 갖게 된다.

구형파 변조과정을 수행하면 GTO의 안정한 동작을 위한 최소 펄스 폭과 높은 기본파 전압의 확보가 가능하지만, 그림 3(a)에서와 같이 구형파의 극성이 바뀌는 시점($+V_{ref} \rightarrow -V_{ref}$)에서 부의 기울기를 갖는 톱니파와 비교과정이 나타날 때, 정상적인 경우 한번의 비교점이 발생하지만 구형파 변조의 경우 특이하게 3번의 비교점이 형성되어 빗금이 쳐진 모양과 같이 운송파의 한 주기 안에 2개의 펄스가 발생할 수 있다. 이 경우 최소 펄스 폭보다 좁은 펄스가 나타나 스위칭 과정의 오류를 유발할 수 있다. 이것은 그림 3(b)와 같이 trapezoidal 변조 과정을 사용함으로써 운송파의 한 주기 안에 항상 1개의 펄스가 얻어지도록 수정할 수 있다.



(a) square-wave 변조



(b) trapezoidal 변조

그림 3. 변조방식의 비교

결과적으로 본 논문에서는 저소음화를 위한 PWM 방식으로 랜덤 스위칭 주파수 PWM 방식을 바탕으로 하는 수정된 RSF-PWM 방식을 제안한다. 수정된 RSF-PWM 방식은 운송파로 삼각파와 톱니파를 혼용하는 방법을 취하며, trapezoidal 변조방식을 사용하여 스위칭 주파수의 광대역 확산 효과와 과변조 없이 기본파 전압을 확보할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 결과분석

제안된 소음저감 기법의 타당성을 입증하기 위하여 SPWM과 수정된 RSF-PWM에 대하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 비교 분석하였다.

SPWM과 수정된 RSF-PWM에서 각각의 출력주파수가 15, 30Hz인 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1과 표 2는 각 시뮬레이션에 대한 기본파 전압의 크기 m_c , 스위칭 주파수의 범위 f_{sw} , 그에 따른 주파수 변조지수 m_f 의 범위를 나타낸 것이다. 그림 4, 5는 SPWM, 그림 6, 7은 수정된 RSF-PWM의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. (a)는 변조과정과 상전압, 선간전압을 나타내고, (b)에는 선간전압의 고조파 분포를 나타내었다.

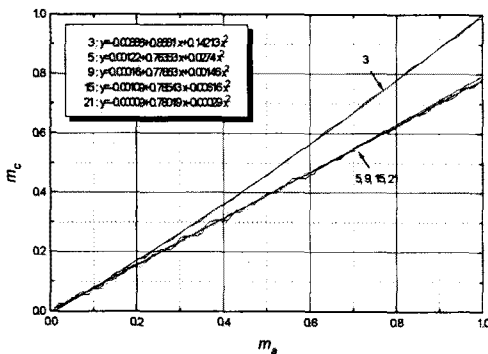
표 1. SPWM의 시뮬레이션 파라미터

case	f_0	m_f	f_{sw}	m_c	m_a
그림 4	15	21	315	0.25	0.318
그림 5	35	9	315	0.58	0.738

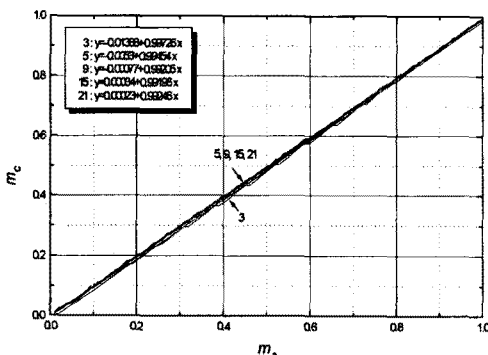
표 2. RSF-PWM의 시뮬레이션 파라미터

case	f_0	m_f (m_{fmax})	f_{sw} (f_{swmax})	m_c	m_a
그림 6	15	33.6~8.4 (21)	504~126 (315)	0.25	0.318
그림 7	35	20.6~5.1 (12.8)	720~180 (450)	0.58	0.738

그림 6, 7(b)의 수정된 RSF-PWM의 시뮬레이션 결과를 보면 평균 스위칭주파수인 300~400Hz 영역에서 다른 주파수 대역에 비하여 높은 고조파 성분을 포함하



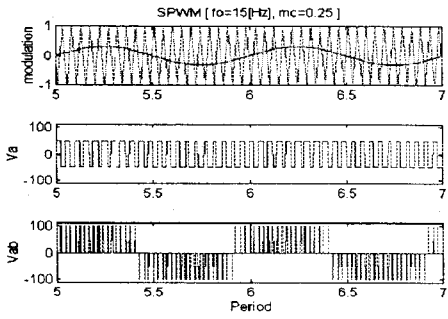
(a) 정현파 변조방식



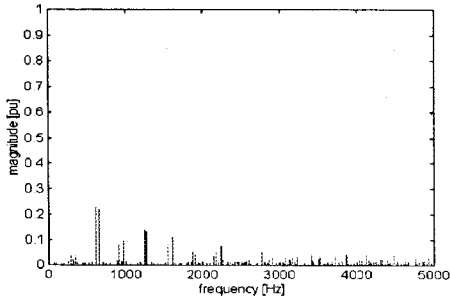
(b) 구형파 변조방식

그림 2. 변조방식에 따른 $m_a - m_c$

고 있음을 볼 수 있는데 이는 근본적으로 GTO 스위칭주파

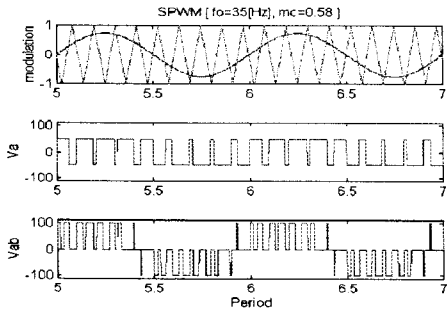


(a) 출력전압

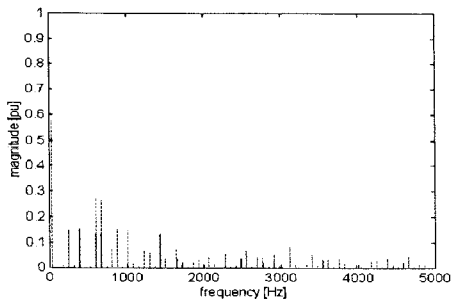


(b) 고조파 스펙트럼

그림 4. SPWM의 출력파형 및 고조파 ($f_o=15$, $m_f=21$, $m_c=0.25$)

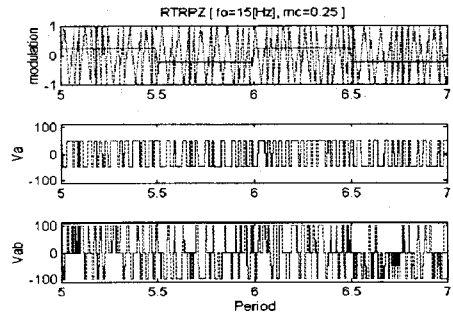


(a) 출력전압

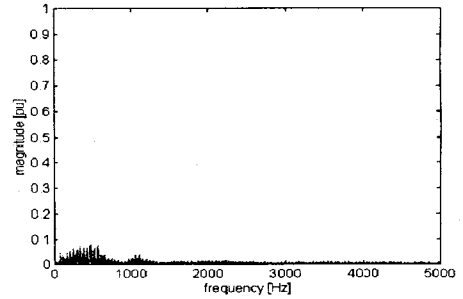


(b) 고조파 스펙트럼

그림 5. SPWM의 출력파형 및 고조파 ($f_o=35$, $m_f=9$, $m_c=0.58$)

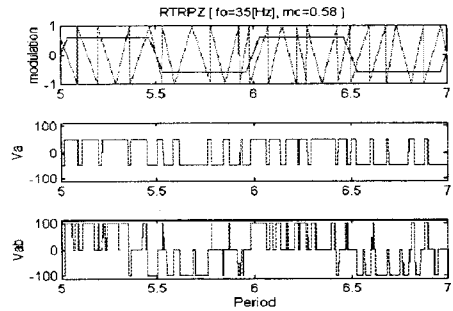


(a) 출력전압

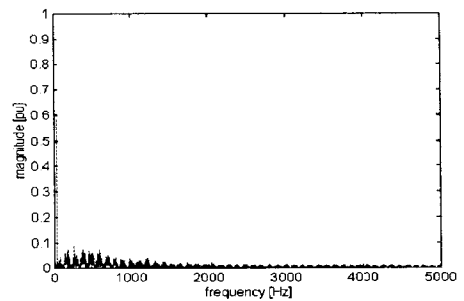


(b) 고조파 스펙트럼

그림 6. 수정된 RSF-PWM의 출력파형 및 고조파 ($f_o=15$, $m_c=0.25$)



(a) 출력전압



(b) 고조파 스펙트럼

그림 7. 수정된 RSF-PWM의 출력파형 및 고조파 ($f_o=35$, $m_c=0.58$)

수의 한계를 극복할 수 없고, 수정된 RSF-PWM 방식이 SPWM 방식의 기본적인 특성으로부터 파생되었다는 데 기인하는 결과이다.

SPWM과 수정된 RSF-PWM의 시뮬레이션 결과를 비교해보면, (a)의 변조과정에서 수정된 RSF-PWM의 경우 변조파의 진폭 m_a 가 출력전압 변조지수 m_c 와 일치되는 것을 알 수 있다. (b)의 고조파 스펙트럼에서는 수정된 RSF-PWM 방식의 고조파 분포가 SPWM 방식과 비교했을 때 특정 고조파에 집중되지 않고 광대역에 걸쳐있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 고조파가 특정 주파수에 집중되어 발생하는 스위칭에 의한 전자기적 가청소음을 저감시킬 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 스위칭주파수에 상당한 제약을 받는 견인용 유도전동기 구동용 인버터에서 발생하는 전자기적 가청소음의 저감을 위하여 수정된 RSF-PWM 방식을 제안하였다.

제안한 RSF-PWM 방식은 변조시에 삼각파와 톱니파가 혼용된 운송파를 사용하며, 삼각파 뿐만 아니라 톱니파 기울기의 극성도 랜덤하게 변화시킴으로써 펄스 위치의 변동폭을 확대시켜 펄스 위치의 랜덤(RPP-PWM) 효과까지 얻을 수 있는 방법이다. 이 방법은 근본적으로 SPWM의 성질을 가지므로 출력 기본파 전압의 선형성 문제도 아울러 해결된다.

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하여 SPWM 방식의 특성과 비교하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 RSF-PWM 방식이 고조파의 특정주파수 대역 집중 현상을 보이는 SPWM 방식과 달리 전압과 전류에서 고조파 광대역 분산 특성을 가짐을 확인하였으며, 이에 따라 소음의 저감 효과를 얻을 수 있다.

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 위탁연구내용 중 일부임.

(참 고 문 헌)

- [1] Stanislaw Legowski and Andrzej M. Trzynadlowski, "Advanced Random Pulse Width Modulation Technique for Voltage-Controlled Inverter Drive Systems", Proceedings of APEC, pp. 100~106, 1991.
- [2] S.Y.R. Hui, I. Oppermann, and S. Sathikumar, "Microprocessor-Based Random PWM Schemes for DC-AC Power Conversion", IEEE Trans. on PE, Vol. 12, No. 2, pp. 253~260, March 1997.
- [3] B. K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, 1997.
- [4] John M. Boureois, "PWM Technique for Acoustic Noise Reduction in Power Applications", Proceedings of APEC, pp. 141~145, 1993.
- [5] S.Y.R. Hui, S. Sathikumar, and Ki-Kwong Sung, "Novel Random PWM Schemes with Weighted Switching Decision", IEEE Trans. on PE, Vol. 12, No. 6, pp. 945~952, November 1997.
- [6] Aleksandar M. Stankovic, George C. Verghese, and David J. Perreault, "Analysis and Synthesis of Randomized Modulation Schemes for Power Converters", IEEE Trans. on PE, Vol. 10, No. 6, pp. 680~693, November 1995.