

인버터에 의한 가변속 구동장치의 스위칭 써지 특성 분석

송승엽· 김재철 이도훈 신중은 임태훈
 송실대학교 파워콤

The Analysis for the Characteristics of Switching Surge of Adjustable Speed Drive by Inverter

Song Seung Youp· Kim Jae Chul Lee Do Hoon Sin Jung Eun Im Tae Hoon
 Soongsil University Powercomm

Abstract - By development of power electronics technology, the increasing of inverter's switching frequency lead to the development of speed control technology of induction motor. But the surge voltage including harmonic component in output waveform can cause the motor to generate power losses, torque ripple, acoustic noise and oscillation.

This paper is analyzed the characteristics for switching surge of adjustable speed drive and is presented the problem by inverter.

1. 서 론

80년대 이후 직류기가 속도제어의 장점보다는 구조의 복잡성과 유지보수의 어려움 때문에 점차 사용이 줄어들고 있다. 반면 전력전자 기술의 향상과 제품이 싸고 구조가 간단하며 유지보수가 쉬운 유도전동기의 속도 제어 기술의 발전이 이루어지면서 유도전동기 가변속 드라이브 장치의 사용이 에너지 효율적 관리를 필요로 하는 산업 현장에서 눈에 띄게 증가되고 있다.

이에 따라 부하의 효율적인 운전측면에서 전동기의 속도제어에 필요한 인버터 파형을 보다 정현적으로 만드는 GTO나 IGBT와 같은 고속의 스위칭 소자가 개발되어 왔으며, 더욱 대용량이며 고속 스위칭이 가능한 새로운 소자가 개발될 것이다. 그러나 이와 같은 새로운 소자의 사용은 스위칭에 따른 전압과 전류의 매우 빠른 상승시간 때문에 전동기 권선에 과전압을 발생시킬 수 있다.

차단기의 스위칭 써지는 단기·지속적이며 확실적인 현상이지만, 인버터의 강제적인 스위칭에 의한 속도 제어시 발생하는 반복성의 스위칭 현상은 차단기의 재발화에 비해 부하측의 발생전압은 적지만 그 반복성으로 인해 전동기 권선에 좋지 못한 영향을 미치는 것으로 예측된다.

진공차단기와 같은 개폐기로 유도전동기 부하를 전원에서부터 개폐하는 전동력 시스템에서 전동기의 소손사고는 스위칭 써지의 크기가 사고의 원인으로 규명이 가능하지만, 가변속 운전 장치를 지속적으로 사용하는 시스템에서의 소손사고는 인버터의 스위칭에 의한 과전압의 빈도수가 개폐기의 개폐동작과는 비교할 수 없는 정도로 많이 발생되어 유도전동기 권선에 빈번한 전압 스트레스로 작용할 수 있는 것으로 볼 수 있다. 이 메커니즘을 규명하는 것은 시스템의 신뢰를 높이는 데 중요한 자료가 될 것이다.

본 논문에서는 이와 같은 가변속 구동장치의 스위칭 써지에 대한 특성을 분석하고 인버터 구동에 따른 문제점을 제시할 것이다.

2. 가변속 구동장치

2.1 가변속 구동장치의 형태

유도전동기의 속도제어를 위한 가변속 구동장치는 컨

버터부에서 교류전원을 직류전원으로 변환한 다음, 인버터에 의해 다시 전동기에 필요한 가변주파수의 교류전원으로 변환하여 정현파의 전압을 전동기에 공급한다. 이때 인버터부로 들어오는 직류전원의 종류에 따라 전압원 인버터(VSI: Voltage Source Inverter)와 전류원 인버터(CSI: Current source Inverter)로 나누어진다.

전압원 인버터는 싸이리스터를 사용하여 직류전압으로 변환하고 부하에는 구형파 전압이 가해지도록 스위치의 도통시간을 가변함으로써 주파수를 가변할 수 있다. 부하가 유도성일 경우 인가전압은 양(+)인데 비해 부하에 흐르는 전류는 음(-)인 기간이 있는데, 이는 부하의 인덕턴스에 축적된 에너지가 이 기간 동안에 전원으로 되돌려 보낸다는 뜻이고 이것은 부하의 무효전력으로 된다. 이 무효전력을 처리하기 위해서 각 스위칭에 역병렬로 다이오드를 접속시키는데, 이 다이오드를 귀환 다이오드(feedback diode)라고 한다.

그림 1은 대표적인 전압원 인버터의 구성도이며, 전압원 인버터는 구동되는 전동기에 가변주파수 전압을 공급한다.

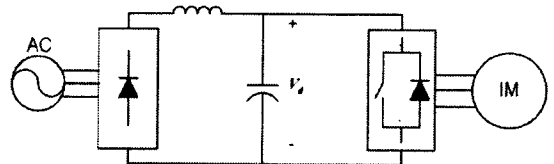


그림 1 전압원 인버터 시스템

전류원 인버터는 시스템이 간편하고 과전류 보호기능을 보유하며 전력회생제동이 가능하므로 주로 중·대형 전동기 운전에 많이 사용되고 있다. 전압원 인버터와 비교해서 전원은 정전류원이고 스위치는 귀환다이오드를 포함하지 않은 단방향 스위치이다. 부하를 유도성 부하로 가정한다면 부하전류가 순시에 반전할 수 없기 때문에 그림 2에 보는 바와 같이 부하 인덕턴스의 축적에너지를 흡수할 회로를 병렬로 부가시킨다.

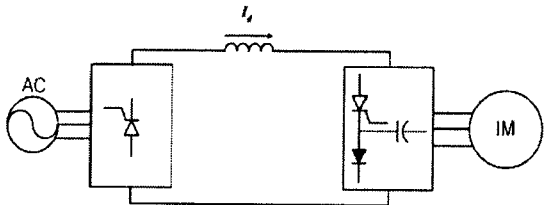


그림 2 전류원 인버터 시스템

PWM 인버터는 가변속 유도전동기의 속도 제어를 위

해 사용된다. 이는 가변 전압과 가변 주파수(Variable Voltage Variable Frequency : VVVF)의 출력을 동시에 제어하여 자속을 일정하게 유지하므로 광범위한 가변속 운전에 대해 전동기의 효율과 역률의 저하없이 속도 제어가 가능하다. 또 특정 고조파를 제거 혹은 감소시킬 수 있는 이점이 있으므로 교류전동기의 속도제어와 최대토크 운전에 많이 쓰이고 있다.

PWM 인버터의 큰 장점은 고조파를 감소시키기 위한 특별한 감쇄필터가 필요없으며 인버터 출력전압의 크기를 제어는 변조된 펄스 파형으로 쉽게 제어가 가능하다. 반면에 스위칭 소자의 빈번한 온·오프 작용으로 인해 많은 고조파를 발생시켜 전력손실은 물론 전자기 장애, 소음, 토오크 리플등의 문제를 초래할 수 있다.

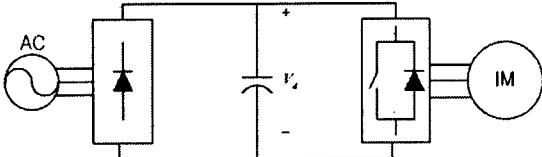


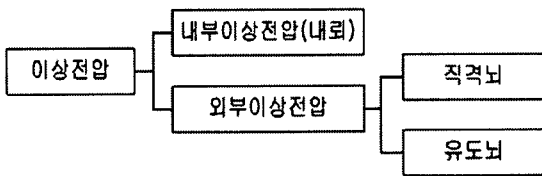
그림 3 PWM 인버터 시스템

3. 써지 이론 및 발생 원리

3.1 써지 파형

표 1에서와 같이 이상전압은 크게 두 가지로 나누어지는데 계통 내부의 원인에 의해 생기는 이상전압을 내부 이상전압 또는 내뢰라고 하며, 계통의 외부 원인에 의해 생기는 이상전압을 외부이상전압이라 한다. 즉, 송전선이나 가공지선에 직격하는 뇌를 직격뇌, 대지로 방전선인 접해 있는 전선로에 유도되는 뇌를 유도뇌라고 한다.

표 1. 이상전압의 분류



이 중에 뇌전압 또는 뇌전류의 파형은 그림 4와 같은 충격파(impulse wave)이다.

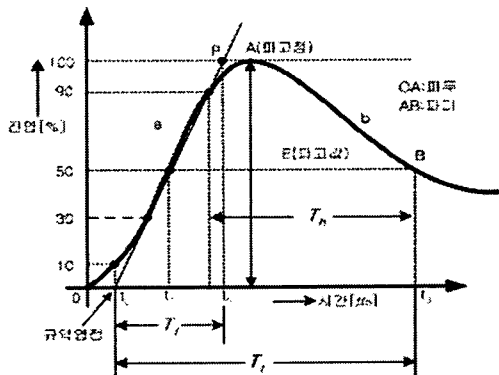


그림 4 충격 파형

충격파를 써지(surge)라 부르며, 이것은 극히 짧은 시간에 파고값에 달하고 극히 짧은 시간에 소멸하는 파형을 갖는 것이다.

그림 4에서 A점을 파고점, B점을 과고값, OA를 파두, AB를 과미라고 한다. 충격파는 보통 파고값과 파두 길이와 과미 길이로 나타내며 실제로는 파두 부분의 파형은 일그러지고 있기 때문에 그림 4에 나타난 바와 같이 파고값의 30[%]와 90[%]의 점을 잇는 직선이 시간축과 교차하는 점을 시간의 기준점으로 잡고 이것으로부터 위의 직선이 A점을 통과하는 수평선과 마주치는 점까지의 시간, 즉 그림의 T_1 를 파두길이이라하며 과미길이는 기준점으로부터 과미 부분에서 파고값의 반으로 내려가는 점까지의 시간 T_2 로 나타낸다[1].

3.2 써지 전압의 전송 이론

인버터의 출력단에서 발생한 써지 전압(입사파, e_1)은 케이블을 따라 유도전동기의 입력단 (Z_2)으로 들어가게 된다. 그러나 케이블의 특성임피던스 (Z_1)와 유도전동기의 임피던스 (Z_2)가 정합(match)또는 부정합(mismatch)이냐에 따라 반사 또는 투과가 일어난다. 그림 5은 반사와 투과의 개념을 그림으로 나타내었다.

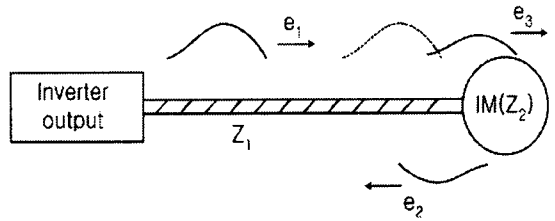


그림 5 써지 전압의 전송 개념도

식(1)과 식(3)은 임피던스 정합일 경우에 반사계수 (β)와 반사전압 (e_1)을 나타내며, 식(2)와 식(4)는 임피던스 부정합일 경우에 투과계수 (γ)와 투과전압 (e_2)를 나타낸다.

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

$$e_2 = \beta e_1 \quad (3)$$

$$e_3 = \gamma e_1 \quad (4)$$

이때 케이블의 특성임피던스 즉 써지 임피던스 (Z_1)은 식(5)과 같으며, 케이블의 길이와는 아무 관계가 없다[1].

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

3.2 써지 전압의 발생원리

인버터 펄스 출력전압에는 필요한 기본파 성분 이외에 스위칭 주파수에 기인하는 많은 고조파성분이 포함하게 된다. 전동기는 이 기본파 성분에 의해 구동되고 그 밖의 고조파성분은 손실이나 잡음등을 발생시키게 된다.

인버터는 상용전원을 직류로 정류하고 스위칭으로 제어하고 있기 때문에 출력전압의 피크치는 통상 직류전압(교류전압 실효치의 $\sqrt{2}$ 배)이하로 된다. 스위칭에 의해 약간의 써지 전압이 발생하고 또한 인버터와 전동기 사

이의 배선에는 인덕턴스 L과 부유용량 C가 존재하며 LC공진으로 더 증폭된 썬지 전압이 전동기측 입력단에 인가된다. 또한 이러한 부유용량으로 인해 인버터와 전동기사이의 $C \frac{dv}{dt}$ 의 충방전 전류가 흐르게 된다.

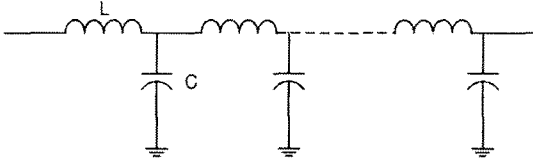


그림 6 인덕턴스와 부유용량

이 충방전 전류는 매우 높은 고주파 성분을 가지면서 접지를 통해 인버터와 전동기 사이를 순환하게 된다. 이러한 고주파 누설전류는 일반적으로 인버터에는 과전류 트립의 원인이 되기도 하며 스위칭 소자의 전류정격을 넘어설 경우에는 소자를 파괴시키기도 한다. 또한 그림 8처럼 전동기측 입력단에 인가된 썬지 전압은 이론상 인버터 출력전압 피크치의 2배에 이르며 인버터 온 시간이 매우 짧은 경우에는 전동기 소전간 절연에 미치는 영향으로 등가적으로 인버터 출력전압의 3배에 이른다고 보고되고 있다. 즉 썬지 전압은 스위칭시 파형의 상승시간(rising time)과 배선길이에 따라 발생전압이 다르지만 PWM 방식의 인버터에서는 피할 수 없는 현상이다.

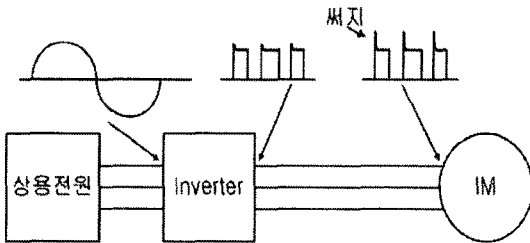


그림 7 인버터 입·출력단과 유도전동기의 입력단에서의 전압파형

4. 썬지전압의 전동기 절연에의 영향

썬지 전압이 전동기에 반복적으로 인가되면 전동기 고정자 권선의 절연열화로 나타나는데 그 원인으로서는 반복적으로 인가되는 썬지 전압과 높은 썬지 전압에 의한 부분방전으로 볼 수 있다. 이러한 열화요인에 의한 절연열화는 전동기의 수명을 단축시키는 주요원인이다.

썬지전압에 대한 전동기의 절연은 코일과 코일사이, 상과 상사이, 코일과 대지사이에 대하여 고려할 필요가 있다. 그러나 이들 중에서 특히 코일과 코일사이의 절연이 가장 문제가 된다고 볼 수 있다. 급격한 썬지전압이 인가될 때 전동기 각 코일간의 분담전압은 균일하지 않게 되고 입력단자에 가까운 코일에 집중적으로 전압이 분포되어 첫 번째 코일의 분담율이 60%까지 달하게 된다. 이렇게 각 코일의 전압분담율이 다르게 되는 것은 썬지 전압 입력시 즉 과도상태에서는 주파수가 상당히 높게 되고 또한 그림 6과 같이 코일과 대지사이에는 부유용량 C가 작용하기 때문이다.

5. 유도전동기의 인버터 구동에 따른 문제점

스위칭 속도가 $0.1\mu s$ 인 IGBT 인버터는 전압상승(dv/dt)이 0에서 피크 전압까지 단지 $0.1\mu s$ 인 것을 나타내며, 이러한 조건에 대해 충분한 절연을 가진 전동기는 많지 않다.

썬지 전압은 일반적으로 transmission line 과 전동기의 임피던스가 동일하지 않을 때 생기는 전압doubling 현상이 원인이 된다. 전동기단자전압은 긴 케이블을 사용할 경우 전동기의 임피던스가 케이블의 임피던스에 비해 클 경우 전압(전류)은 부하에서 인버터로 반사하게 된다. 전압의 절대값은 전동기를 향해 입사되는 피크전압에 반사파 피크전압을 합한 값과 같다[3].

전압상승시간(dv/dt)이 매우 빠르게 되면 전동기 절연은 스트레스를 받게 된다. 그러므로 지나치게 높은 전압상승시간은 일반전동기절연의 빠른 사고의 원인이 된다.

높은 썬지 전압과 빠른 전압상승시간이 원인으로 인한 절연스트레스로 인해 전동기가 사고나게 되며, 이러한 사고 대부분이 상간이나 상과 슬롯사이의 첫 번째 턴에서 발생한다. 전동기권선의 정전용량과 인덕턴스의 원인으로 발생하는 높은 전압은 권선의 첫 번째 턴에서 발생하고 피크전압과 전압상승시간은 권선을 이동하면서 빠르게 약해지게 된다. 일반적으로 전동기의 턴간전압은 권선이 많은 턴으로 구성되므로 매우 낮으나 턴간 또는 상간의 dv/dt의 전압기울기가 높을 때 전동기절연시스템의 절연파괴를 일으켜 결과적으로 전동기 사고로 이어진다.

5. 결 론

가변속 구동장치의 인버터부에서 GTO나 IGBT와 같은 고속 스위칭 소자의 온·오프로 인해 출력단에 많은 고주파 성분을 포함한 스위칭 썬지와 스위칭 소자의 빠른 전압상승시간(dv/dt)은 전동기에 심각한 절연내력저하를 일으킨다. 이것들은 전동기의 전력손실뿐 아니라 더 나아가 사고를 유발할 수도 있다. 게다가 케이블 길이 또한 썬지 전압을 증폭시키는 역할을 하기 때문에 여기에 대한 연구도 이루어져야 한다.

국내에서선 중 저속용 유도전동기의 효율을 향상시키기 위한 연구가 주로 진행되고 있으나 인버터용 대용량 유도전동기에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 인버터용 유도전동기의 스위칭 썬지에 대한 특성 분석을 하였으며 인버터 구동에 따른 문제점 또한 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 포항산업과학연구원의 연구비 지원으로 진행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송길영, "최신 송배전공학", 동일출판사, 1999
- [2] 김종경의 2인, "인버터 스위칭에 의한 가변속 구동장치의 전원측 및 부하측 고조파 해석과 저감방안", 대한전기학회 논문지, 제47권, 8호, pp. 1123-1128, 1998. 8.
- [3] E. Persson, "Transient Effect in application of PWM Inverters to Induction Motor", IEEE Trans. on Industry applications, vol.28, no.5, pp.1095-1101, 1992
- [4] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins, "Power electronics", John Wiley & Sons, 1997
- [5] 김희욱, "인버터 출력파형의 고조파 저감을 위한 개선된 PWM 제어 기법", 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1998