

인버터 구동 고압 유도전동기의 케이블 포설시 스위칭 썬지 특성 분석

권영목, 김재철, 송승엽, 신중은
 숭실대학교

Analysis on the Switching Surge characteristic of Cable Pulling of High-Voltage Induction Motor Fed by Inverter

Young-Mok Kwon, Jae-Chul Kim, Seung-Yeop Song, Joong-Eun Shin
 Soongsil University

Abstract - The recent advancement in the power electronic technique has increased the use of induction motor fed by inverter using high-frequency switching devices. Also the tendency is toward larger size and higher voltage. Therefore, The IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) that is high switching frequency element has been using increase. But, The switching surge voltage was occurred by high switching frequency of inverter has appeared a voltage doubling in the motor input terminal due to mismatching of cable characteristic impedance and motor characteristic impedance.

Actually, The Switching surge voltage became the major cause to occur the insulation failure by serious voltage stress in the stator winding of induction motor. The short during rise time of switching surge and cable length is increased, the maximum transient voltage seen at the motor terminals increases.

In this paper, Analyzed switching surge transient voltage of power cable pulling is used EMTP(Electromagnetic Transient Program) at the induction motor terminal and in cable.

1. 서 론

전력전자 소자의 발전으로 인한 가격대비 효율 그리고 기계적으로 견고한 장점으로 과거 직류 전동기의 역할을 유도전동기가 대신하게 되었다.

현대의 유도전동기 구동장치는 DC-Link가 포함된 인버터 컨버터의 결합, 되먹임 신호 변환기와 소프트웨어 주 처리장치를 포함하고 있다. 이 전기기기의 구성요소는 특히 마모, 노화, 파괴, 충격 또는 비전기적 원인으로 고장나기 쉽다.[1] 따라서 기기를 설계 할 때 발생할 수 있는 여러 사항들을 고려하여야 한다.

유도전동기가 오래전부터 사용되어 온 기기이기 때문에 이전에 많은 연구들이 진행되었지만 전력전자 소자의 발전으로 유도전동기의 구동장치 환경이 계속적으로 변화 발전되어 현재에도 변화된 환경을 적용한 연구들이 진행되고 있다.

일반적으로 정현파를 공급받는 유도전동기의 권선은 전압이 균등하게 분포되어 있다. 하지만 인버터로 제어되는 전동기의 경우 인버터가 스위칭 하는 동안 발생하는 썬지로 인하여 유도전동기 권선에 나타나는 전압분포는 정현파를 공급받는 유도전동기와 달리 불균형하게 분포되어진다. 처음 몇몇 턴에 전체 전압의 50% 이상이 걸리는 현상이 나타난다.[2]

또한 이 인버터 스위칭 썬지로 인해서 발생하는 과도 전압은 케이블의 길이와 스위칭 썬지의 상승시간에 영향을 받는다. 스위칭 썬지의 상승시간이 짧을수록 그리고 케이블이 길어질수록 인버터 스위칭 썬지로 인한 과도 전압은 상승한다.[3]

이렇듯 인버터 스위칭 썬지로 인해 발생하는 과도전압

은 반복적으로 발생하기 때문에 전동기 절연에 큰 영향을 주게 된다. 그래서 전동기 설계시 인버터 스위칭 썬지로 인한 과도전압을 감안하여 설계하여야 하는데 이때 중간에서 인버터와 전동기를 연결하는 전력 케이블에 의한 영향도 고려되어야 한다. 전력 케이블의 위치에 대해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 연구되었다.[4]

본 논문에서는 인버터와 전동기를 연결하는 전력케이블이 비틀어짐에 따라 인버터에서 발생하는 스위칭 썬지에 어떤 영향이 나타나는지를 EMTP를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

2. 스위칭 썬지 전압의 전송이론

인버터와 전동기를 연결하는 케이블에서 PWM 펄스는 송전선로의 진행과 같이 케이블을 전파한다. 케이블의 특성 임피던스가 고정자 권선의 특성 임피던스보다 매우 작으므로 전반사가 일어나며, 입사파와 반사파가 중첩되어 전동기 단자 부근의 전압은 인버터 출력 전압의 2배가 된다. 또한 이 전압은 고정자 권선에 심각한 스트레스를 주게 된다[4].

2.1 전송이론

케이블을 통해 진행되는 입사파는 케이블 끝 수전단과 전동기가 연결되는 불연속점에서 케이블과 전동기의 특성 임피던스 부정합에 의해 반사가 일어나게 된다. 부하단에서 반사파 E'는 식(1)과 같이 구해진다.

$$E' = \frac{Z_M - Z_C}{Z_M + Z_C} E \tag{1}$$

- Z_M : 전동기 특성 임피던스
- Z_C : 케이블 특성 임피던스
- E : 입사파 크기

2.2 전동기 절연에 미치는 영향

썬지 전압이 전동기에 반복적으로 인가되면 전동기 고정자 권선의 절연 열화로 나타나는데 그 원인은 반복적으로 인가되는 썬지 전압과 높은 썬지 전압에 의한 부분 방전으로 볼 수 있다. 이러한 열화요인에 의한 절연열화는 전동기 수명을 단축시키는 주요 원인이 된다[4].

썬지 전압에 대한 전동기 절연은 코일과 코일사이, 상과 상사이, 코일과 대지사이에 대해 고려할 필요가 있다. 그러나 이들 중 특히 코일과 코일사이의 절연이 가장 문제가 된다. 급격한 썬지 전압이 인가될 때 전동기 각 코일간의 분담 전압은 균일하지 않게 되고 입력단자에 가까운 코일에 집중적으로 전압이 분포되어 첫 번째 코일의 분담율이 60[%]까지 이르게 된다. 이렇게 각 코일의 전압 분담율이 다르게 되는 것은 썬지 전압 입력시 즉, 과도 상태에서는 주파수가 상당히 높게 되고 또한 코일과 대지 사이에는 부유용량 C가 작용하기 때문이다.[4]

3. 모델링

본 논문에서는 스위칭 썬지에 대한 특성을 분석하고자 시스템 등가 모델을 인버터-케이블-전동기 시스템을 그림 1과 같이 급준 펄스 전압 전원과 분포 정수 회로, 모터의 썬지 임피던스로 구성하였다.[4]

3.1 시스템 등가 모델링

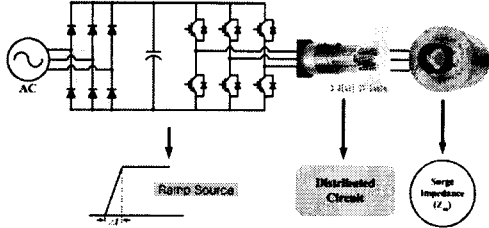


그림 1 시스템 등가모델

급준펄스는 전형적인 과도를 모델링하기 위해 EMTP의 Source Type-12인 램프함수를 이용하여 모델링하였다. ATPDraw의 LCC(Line/Cable Constants) 프로그램을 이용하여 케이블의 기하학적 구조와 물리적인 데이터를 기반으로 지정된 주파수에 대해 케이블 파라미터를 산출하여 적용하였다. 전동기는 1.5[MW]급 유도전동기의 상당 썬지 임피던스를 500[Ω]으로 설정하였다.[4]

3.2 케이블 포설 모델링

본 논문에서는 이상적인 케이블 포설형태와 포설시 일어날 수 있는 형태 3가지를 모델링 하였다. 단심 케이블의 경우 케이블간의 간격이 좁아지는 모델과 3심 케이블의 경우 케이블이 비틀어지는 형태 그리고 단심케이블과 3심 케이블을 연결하는 형태를 모델링 하였다.

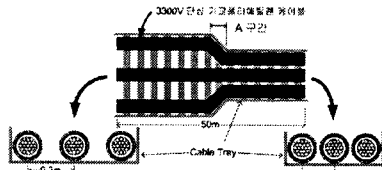


그림 2 단심케이블 선간 거리 변화 모델

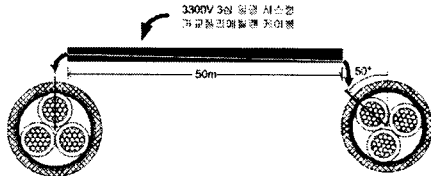


그림 3 3심 케이블 비틀어짐 모델

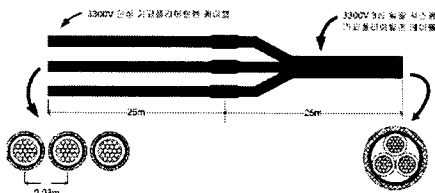


그림 4 단심 케이블과 3심 케이블 연결모델

첫 번째로 단심 케이블은 그림 2와 같이 길이 50m에서 A구간과 같이 케이블의 간격이 0.3m에서 0.03m로

점차 좁아지는 모델을 적용하였다.

두 번째로 3심 케이블은 그림 3과 같이 케이블이 곧은 형태로 포설되지 않고 50°의 각도로 비틀려 포설되는 모델을 적용하였다.

마지막으로 그림 4와 같이 단심 케이블과 3심 케이블을 연결하는 모델을 적용하였다.

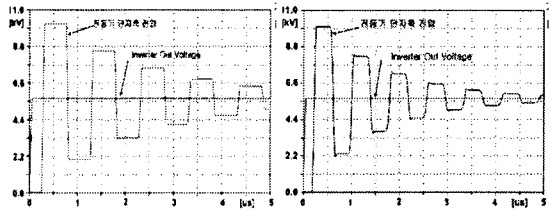
4. 시뮬레이션

인버터출력 전압의 상승시간은 IGBT 소자의 빠른 속도인 50ns로 스위칭 썬지의 상승시간을 정하였다. 케이블은 단심과 3심 케이블을 사용하여 50m의 길이로 하였다.

4.1 이상적인 케이블 포설

케이블을 비틀지 않고 곧은 상태로 선간 거리를 일정하게 포설한 모델이다.

그 결과 그림 5와 같이 스위칭 썬지에 의한 과도전압은 인버터 출력 측 전압보다 최대 1.76[P.U.]의 과도전압이 전동기 단자 측에 나타났다.



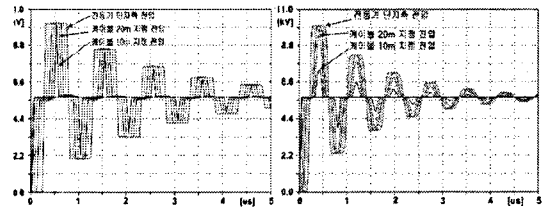
(a) 단심 케이블

(b) 3심 케이블

그림 5 이상적인 케이블 포설시 전동기 단자 측 과도전압 파형 (썬지 상승시간 50[ns] 케이블 길이 50[m])

그림 6은 그림 5의 시뮬레이션 조건과 같은 상태에서 케이블은 총 길이 50m에서 10간격으로 전압을 측정하였다. 전동기의 단자 측 전압은 그림 5의 결과와 같으며 케이블 중간의 전압 파형들은 전송이론에 의해서 투과와 반사로 인해 나타나는 과도전압이다.

단심 케이블의 과도 전압이 3심 케이블의 과도전압보다 케이블의 구조로 인하여 조금 더 높게 나타난다.[4]



(a) 단심 케이블

(b) 3심 케이블

그림 6 이상적인 상태의 케이블 포설시 10m 간격 과도전압 파형 (썬지 상승시간 50[ns] 케이블 총 길이 50[m])

4.2 단심 케이블의 선간거리 변화

단심 케이블의 선간거리가 변화되는 것을 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 그림 7과 같이 케이블 간격 변화구간에서의 과도전압을 나타내었다.

케이블의 굴곡시작점에서는 초기 과도전압이 인버터 출력전압보다 약간 낮게 나타난다. 그렇지만 전동기 단자에서 반사되어오는 전압에 의하여 전압은 다시 상승하게 된다. 이때, 상승된 과도전압은 전압 단에서 반사되어오는 전압에 의하여 과도전압은 다시 감소하게 된다. 이 때문에 케이블 중간지점에서는 반사파의 전송시간으로 인하여 계단형태의 과도전압이 나타나게 된다.

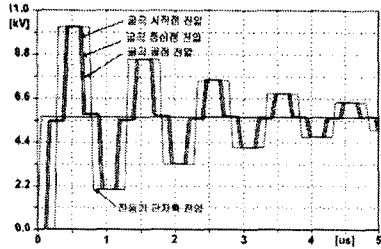


그림 7 단심 케이블 선간거리 변화시 과도전압 파형 (써지 상승시간 50[ns] 케이블 총 길이 50[m])

4.3 3심 케이블의 비틀림

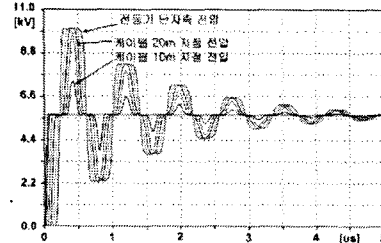


그림 8 케이블 50° 비틀어진 상태의 10m 간격 과도전압 파형 (써지 상승시간 50[ns] 케이블 총 길이 50[m])

3심 케이블이 비틀어진 상태를 시뮬레이션 하였다. 케이블은 총 50°의 각도를 케이블 전 구간에서 걸쳐 균등하게 비틀었다. 그 결과는 그림 8과 같이 10m 간격으로 전압을 나타내었다.

케이블을 10° 비틀어 전동기에 연결된 경우와 20° 비틀어 전동기에 연결된 경우 그리고 그림 5와 같이 50° 비틀린 경우의 시뮬레이션 결과 모두 인버터 스위칭 써지 전압으로 인해 발생하는 과도전압은 같은 크기와 같은 형태의 파형으로 발생함을 EMTP 시뮬레이션 결과로 볼 수 있었다. 본 논문에서는 50° 비틀어 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다.

4.4 단심 케이블과 3심 케이블 접속

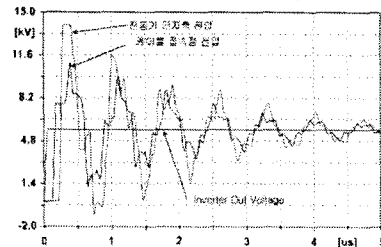


그림 9 단심 케이블과 3심 케이블 접속시 과도전압 파형 (써지 상승시간 50[ns] 케이블 총 길이 50[m])

단심 케이블과 3심 케이블을 접속한 모델을 시뮬레이션 하였다. 과도전압은 케이블 접속점과 전동기 단자측 전압을 나타내었다.

서로 다른 종류의 케이블이 접속되었을 경우 그림 9와 같이 케이블간의 특성임피던스 차이로 인하여 전동기 단자측에 나타나는 전압은 인버터 출력 전압보다 2.46[P.U.]크기의 과도전압이 나타났다. 이는 케이블 접속점에서 특성임피던스 차이로 발생한 과도전압에 의해 전동기 단자에 더욱 높게 나타난 것으로 볼 수 있다.

EMTP 시뮬레이션 결과인 그림 6, 7, 8을 보면 케이블의 간격이 변화되거나 케이블이 비틀어져 있거나 굽은 상태에서 나타나는 전압파형의 형태는 같다. 이는 식(1)

을 이용하여 반사계수를 계산하면 케이블의 간격이 변하기 전과 변한 후 그리고 비틀기 전과 비틀린 후에 특성임피던스는 거의 변화가 없기 때문에 반사계수는 무시할 수 있을 정도로 매우 작아진다. 케이블 중간에서 나타나는 전압파형이 계단형태를 보이는 것은 반사파의 전송시간 차이로 인한 것이다. 이때 30m, 40m 지점에 나타나는 전압은 전동기 단자에 나타나는 전압보다 약 1% 정도 높게 나타난다. 하지만 전동기 단자에 나타나는 전압의 크기는 케이블을 비튼 경우나 굽은 상태의 경우 모두 같은 전압이 나타났다.

그러나 그림 9와같이 서로 다른 특성임피던스를 가진 케이블이 상호 접속되었을 경우 과도전압은 전동기와 케이블이 접속된 경우와 같이 케이블 접속점에서 높은 과도전압이 나타난다. 이는 과도전압이 전동기 단자에 나타나기 전에 케이블 접속점에서 한번 증가하는 형태가 된다. 결과적으로 전동기 단자에는 더욱더 높은 과도전압이 나타나게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 인버터 스위칭 써지 전압에 의해 발생된 과도전압이 케이블을 지나 고압유도전동기 단자에 나타날 때 케이블 포설에 따른 케이블 간격의 변화나 비틀림 그리고 케이블 접속에 대한 과도전압 영향을 알아보았다.

일반적으로 임피던스가 다른 두 도체가 결합 할 때에는 두 도체의 특성임피던스가 다르며, 그 접합점에서 투과와 반사가 일어난다. 케이블과 전동기 단자 사이에서는 반사파로 인하여 전동기 단자에 높은 과도전압이 형성된다. 그렇지만 같은 도체가 간격이 변화되거나 비틀어져서 임피던스가 변화되어 임피던스 matching이 완전히 이루어지지 않더라도 이 때 나타나는 임피던스의 변화는 적고 이로 인한 반사파는 매우 미미하기 때문에 전부 투과 된다고 볼 수 있다.

본 논문에서 시뮬레이션 한 결과 케이블의 간격이 변화거나 비틀어져 같은 케이블에서 임피던스가 조금 달라져더라도 그 변화된 크기는 매우적다. 그래서 케이블의 간격이나 비틀림으로 인한 영향 없이 인버터 스위칭 써지에 의한 과도전압은 전동기 단자에 나타나게 된다. 하지만 특성임피던스가 다른 케이블 접속한 경우 접속점의 반사와 투과로 인하여 전동기 단자에 나타나는 전압은 한 종류의 케이블로 연결되었을 경우보다 크게 나타났다.

결론적으로 인버터 구동 유도전동기에 연결되는 케이블은 접속점 없이 하나의 케이블로 전동기 까지 연결되어야 한다. 그렇지 않으면 전동기는 절연에 심각한 영향을 받을 수 있다.

감사의 글

본 논문은 에너지 관리공단의 연구비 지원으로 진행 되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] E.A. EBRAHIM, N. HAMMAD "Fault Analysis of Current-Controlled PWM-Inverter Fed Induction Motor Drives" Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp1065-1070, 2003
- [2] Christopher J. Melhorn, Le Tang, "Transient Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp1065-1072, July/August 1997
- [3] L. Gubbala, A. von Jouanne, P. Enjeti, C. Singh, H. Toliyat, "Voltage Distribution in the Winding of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages" Power Electronics Specialist Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE, Volume: 1, 18-22 June 1995
- [4] 송승엽, "EMTP를 이용한 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지 특성 분석" 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사학위 논문. 2004. 6