

인버터구동 고압전동기 열화특성 분석 및 필터 설계기법 확립

최 영찬, 이 상동, 김 익모, 정 명길  
현대중공업 기전연구소

Insulation System and Filter Design for Inverter-Fed Motor

Young-Chan Choi, Sang-Dong Lee, Ik-Mo Kim, Myung-Gil Jung  
Hyundai Heavy Industry Mechatronics Research Institute

**Abstract** - Recently, the insulation breakdown accident happened at 6.6kV inverter driving motor brings out the reliability decrease to the motor driving system. We need to find the solution with system engineering level.

The objectives of this study are developing the appropriate filter for the drive to protect the motor and the insulation system of motor which is driven by inverter.

The circuit parameters of cable are calculated by EMTP(Electromagnetic Transient Program) to simulate the system. And we use MATLAB to find the appropriate filter parameter. The simulation and the test results are compared to verify the suitability of the filter parameter.

We clarify the cause of the deterioration of the inverter driving motor through the analysis of insulation breakdown accidents. The endurance test scheme and the configuration method of insulation system are established.

1. 서 론

최근 잇따른 절연파괴사고의 발생으로 인하여 인버터 구동전동기의 6.6kV 고압전동기에 대한 신뢰성이 크게 떨어졌고 절연시스템을 보강하는 것만으로는 한계가 있으며 시스템엔지니어링차원에서의 해결방안이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 인버터 구동으로 인한 전동기의 절연파괴사고의 원인분석을 통하여 절연파괴사고 메카니즘을 명확히 하여 전동기측에서의 절연보강방안을 제시하였고 계통에 발생하는 썬지전압으로부터 전동기를 보호하기 위하여 적합한 필터를 설계, 조합하는 방법을 확립함으로써 내구성 향상에 기여하였다. 필터는 EMTP(Electromagnetic Transient Program)로 회로를 구성하고 있는 요소모델링을 실시하여 회로정수를 산출하였고 MATLAB을 이용하여 시스템회로 시뮬레이션을 실시하여 필터설계를 하였고 실제 운전중인 전동기에 적용하여 측정된 결과와 시뮬레이션결과의 검증을 통하여 설계한 필터의 적합성을 확인하였다.

2. 인버터구동 고압전동기의 절연파괴 사고

2.1 인버터 구동 전동기 시스템의 구성

당사에서 적용하고 있는 인버터구동 고압전동기시스템은 Fig.1과 같이 저압인버터와 Step-up Transformer로 구성되며 Transformer의 출력전압을 전동기의 입력전원으로 사용하고 있다.

인버터구동 고압전동기의 절연시스템은 상용주파전원 구동 전동기보다 내전압성을 향상시키기 위하여 소선, 대지절연을 전체적으로 보강하여 제작하고 있으나 운전 개시후로부터 짧은 기간내에 절연파괴사고를 일으키고

있다.

인버터는 상용주파 전원을 정류하여 평활시키기 때문에 컨버터와 인버터사이의 직류전압은 상용주파전압의 약  $\sqrt{2}$ 배가 되며 출력전압의 파고치는 통상적으로 이 직류전압정도이다. 그러나 인버터와 전동기간의 배선에는 인덕턴스(L)와 부유용량(C)이 존재하며 인버터 소자의 스위칭에 의한 전압변화가 LC공진에 의한 썬지전압을 발생시켜 전동기 단자에 높은 전압을 인가하게 되어 전동기의 절연에 손상을 주게되고 결국에는 절연파괴사고를 일으키는 것으로 밝혀져 있다[1].

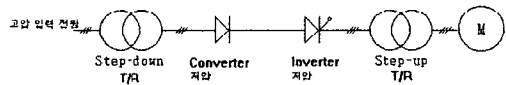


Fig.1 당사 인버터 구동 고압전동기 시스템

2.2 절연파괴사고 현상

Fig.2는 절연파괴사고를 일으킨 전동기 코일형상을 나타낸다. Lead Cable이 연결된 코일Group의 첫 번째 코일과 두 번째 코일에서 과열로 인한 절연물의 심한 변색이 확인되었다. 사고는 슬롯내부에서 이들 코일과 대지간 절연파괴 형태로 나타났다.



Fig.2 절연파괴사고 코일의 엔드부 형상

2.3 인버터구동에 따른 절연파괴 메카니즘

인버터 출력전압의 스위칭시 발생하는 썬지전압은 전동기입력단에서는 선로정수에 의해 중첩되어 2배까지 상승하나 인버터의 On시간이 매우 짧은 경우에는 인버터 출력전압의 3배 크기에 이른다고 보고되고 있다[2]. 이와 같은 썬지전압으로 인해 전동기 권선은 절연열화가 되고 결국에는 소손하게 된다. 이것은 견고하고 무보수화를 위하여 유도전동기를 사용하고 있는데 이로 인한 신뢰성 저하는 치명적이라고 할 수 있다.

인버터 구동전동기의 경우와 같이 급격한 썬지전압이

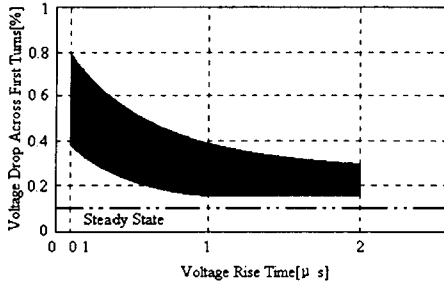


Fig.3 첫 번째 코일의 전압분담율

인가되면 전동기 각 코일간의 분담전압은 균일하지 않게 되고 입력단자에 가까운 코일에 집중적으로 전압이 분포되어 각 코일에 가해지는 전류밀도의 불균형을 일으켜 Layer Short를 초래하게 된다(3).

Fig.3은 써지전압 파형의 Rising Time에 대한 고정자 권선의 첫 번째 코일의 전압분담율을 나타낸다. 인가전압의 상승시간이 1 μs 이하일 때 첫 번째 코일에는 40~80%의 전압이 걸리게 된다(4). 이렇게 각 코일의 전압분담율이 다르게 되는 것은 써지전압 입력시 즉 과도 상태에서는 주파수가 상당히 높게 되고 또한 코일과 대지사이에는 부유용량 C가 작용하기 때문이다.

이와 같이 반복되는 써지전압으로 인해 고압전동기의 소선절연이 Damage를 입게 되고 턴간 Layer Short가 발생하여 과전류가 흐르게 되고 이로 인한 Overheating으로 인해 절연물의 절연내력이 급격히 감소하였고 슬롯내부의 Weakpoint에서 대지간 절연파괴 사고로 이어졌다고 볼 수 있다.

이것을 정리하면 다음과 같다.

인버터 스위칭 써지 → 과전압 → 부분방전 → 유기물의 침식 → 턴간 Layer Short → 과전류 → 온도 상승 → Overheating → 절연물 열화(변색) → 절연내력 감소 → 절연파괴

써지전압에 대한 전동기 절연은

첫째, 코일과 코일 사이  
둘째, 상과 상 사이  
셋째, 코일과 대지사이에 대하여 고려할 필요가 있다.  
그러나 이들 중에서 특히 코일과 코일사이의 절연이 가장 문제가 된다고 볼 수 있다.

### 3. 전동기 절연시스템 강화 대책

인버터구동 전동기의 경우 앞 절에서 설명한 바와 같이 급증한 써지전압이 원인으로 절연파괴사고를 일으키는 것이므로 근본적으로는 써지전압을 억제하는 것이 가장 바람직한 방법이나 지금까지는 전동기 제조메이커를 중심으로 이러한 써지전압에 견디는 절연시스템을 구축하는 방법에 의해 해결하려는 노력이 이루어져 왔다. 저압전동기의 경우에는 절연보강을 통하여 후자의 방법으로 해결할 수 있었으나 고압전동기의 경우에는 고압절연시스템의 한계와 소형경량화에 대한 요구 등을 고려할 때 적절한 방법이라고 할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 고압전동기 절연시스템의 적절한 절연보강과 필터설계를 통한 써지전압의 억제에 대한 대책을 찾는 것이다. 필터설계를 통한 써지전압의 억제에 대해서는 다음절에서 서술하기로 하고 여기서는 Fig.4와 같이 전동기단에서의 절연시스템 강화 대책에 대하여 서술한다.

첫째, 절연파괴사고분석을 통하여 Lead 케이블에 인접한 코일의 제1턴을 절연보강할 필요가 있다. 내전압성이 뛰어난 Kapton Tape로 절연보강 처리함으로써 턴

간 Layer short를 극력 억제시키며 내부분방전성을 향상시킨다.

둘째, 소선간의 절연파괴는 결과적으로 대지간의 절연파괴로 이어지므로 소선절연의 턴간 절연보강뿐만 아니라 적절한 대지절연의 선정도 중요하다. 그러므로 당사에서 일반적으로 인버터 구동 고압전동기에 적용하고 있는 절연시스템을 적용한다.

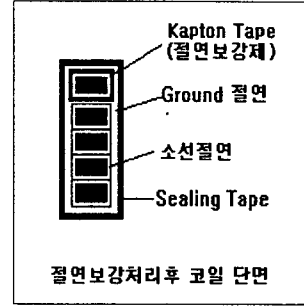


Fig.4 절연보강 코일 단면 형상

### 4. 인버터의 정현파 필터설계 및 적용 검증시험

현재까지 알려진 전압상승율의 억제방법중 상당히 효과적인 것은 전동기 구동시스템에 필터를 부착하는 것이다. 전압형 인버터 구동인 경우 전압상승율 억제를 위한 방법으로는 인버터 출력단에 필터를 부착하는 것이며 인버터의 스위칭주파수를 낮추는 것과 동일한 효과를 거둘 수 있다. 그러나 이방법의 단점 중 하나는 필터설계의 관점에 따라 필터값이 달라지므로 필터의 부피와 무게가 상당히 커질 수 있다. 이것은 설치면적을 증대시키고 비용을 초래하게 된다. 또한 수동 소자로 필터를 구성하므로 필터 내부의 전력 손실도 상당히 커질 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 최소화하면서 써지전압을 억제시키는 필터 설계법을 개발하는 것이며, 3절에서 서술한 바와 같이 전동기 절연보강을 통하여 보완하므로써 인버터 구동 고압전동기 전용의 절연시스템을 구축하는 것이다.

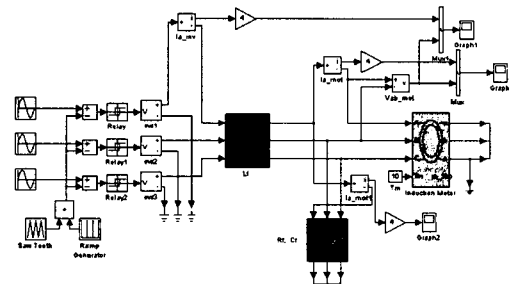


Fig.5 인버터 출력필터 시뮬레이션 회로

#### 4.1 인버터의 정현파 필터설계

이 필터는 선로에 의한 써지전압만 감소시키는 필터보다 더 저역필터를 구성하여 파형의  $\frac{dv}{dt}$  를 크게 감소시켜 정현파에 가깝도록 한다. 이때 필터 콘덴서의 설계는 이 캐패시턴스와 전동기의 자화 인덕턴스가 전동기 정격 주파수 이하에서 공진하도록 설계하며 직렬 리액터의 인

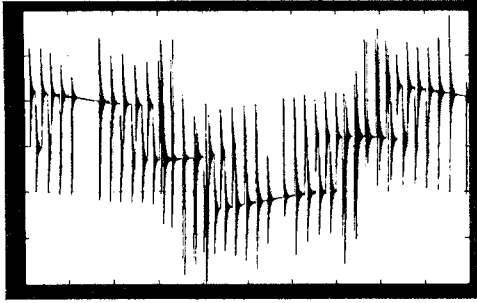


Fig.6 필터 미설치시 전동기단 전압파형

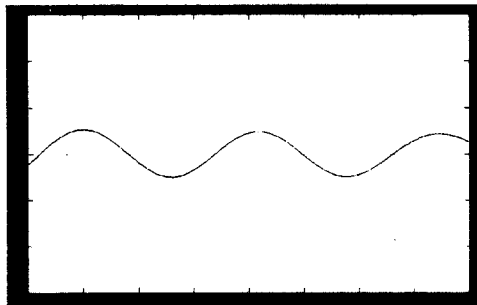


Fig.7 필터 설치시 전동기단 전압, 전류파형

인덕턴스는 콘덴서에 의한 인버터의 과도한  $\frac{di}{dt}$  에 의한 인버터의 고장을 방지하도록 설계한다[5]. 일반적으로 필터  $L_f$ ,  $C_f$  의 공진주파수는 인버터 전역용 반도체소자의 스위칭 주파수 ( $f_s$ )보다 1kHz 정도 낮게 설계한다. Fig.5는 인버터 필터영향을 보기 위한 시뮬레이션회로이다.

Fig.6은 필터를 설치하지 않은 경우의 전동기단 전압 파형이며 MATLAB으로 시뮬레이션 한 결과를 보여준다.

시뮬레이션에 사용한 전동기의 자화 인덕턴스는 68mH이므로 필터 콘덴서는 식(4.1)에

$$C_f = \frac{1}{L(2\pi f)^2} \quad (4.1)$$

의해 계산되며 이때 주파수  $f$  는 전동기 정격 주파수보다 낮은 주파수를 선택한다. 여기서는 35Hz로 하여  $C_f$  를 300  $\mu$ F으로 설계하였다. 그리고 인버터 보호용 리액터의 인덕턴스는

$$L_f = \frac{1}{C(2\pi f_c)^2} \quad (4.2)$$

에 의해 계산되며  $f_c$  는  $f_s > f_c + 1$  kHz 정도로 설계하며,  $L_f$  를 1000  $\mu$ H로 설계하였을 경우의 전동기단 파형은 Fig.7과 같다.

상기의 시뮬레이션결과를 검증하기 위해 380V, 50HP의 Pump용 전동기를 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)인버터로 구동하여 시험한 결과, Fig.8의 결과를 얻었으며 시뮬레이션결과와 유사함을 알 수 있다.

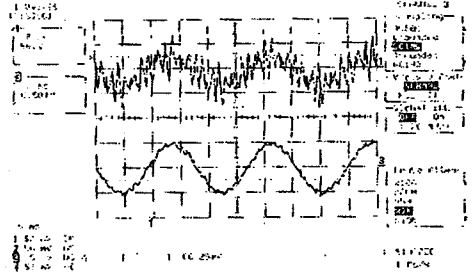


Fig.8 필터 콘덴서 입력전류와 전동기입력전압 파형

여기서 출력단 필터는 시뮬레이션에서와 동일하게 1,000  $\mu$ H리액터와 136 $\mu$ F콘덴서를 사용하였다. 실험에서도 파형의 정형화는 필터의 Parameter, 인버터소자의 스위칭주파수에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 최근 빈번히 절연파괴사고를 발생하여 많은 관심의 대상이 되고 있는 인버터구동 6.6kV 고압 전동기의 절연파괴사고 메카니즘 규명과 시스템엔지니어링 차원에서의 해결방안에 대하여 검토하였고 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 인버터 구동 고압전동기의 절연사고 사례분석을 통하여 턴간 Layer Short로 인하여 과전류가 흐르게 되고 Overheating으로 절연물이 열화하여 절연파괴사고를 일으키는 메카니즘을 규명하였다.
- 2) 인버터 구동 고압전동기 절연파괴사고에 대한 시스템 엔지니어링 차원에서 써지전압을 억제하는 접근과 함께 전동기 절연시스템의 절연보강을 통한 보완대책을 확보하였다.
- 3) 인버터 시스템 분석과 요소 모델링을 통하여 출력 파형 시뮬레이션을 통하여 필터 설계기술 확립하였으며 조합시험 결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.
- 4) 인버터, 필터 및 전동기의 조합시험을 실시하여 설계필터가 전동기입력단의 입력파형에 미치는 영향을 검증하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] M. Kaufhold, G. Borner, M. Eberhardt, and J. Speck, "Failure Mechanism of the Interturn Insulation of the low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 12, No. 5, pp. 9-15, 1996
- [2] 森安正司, 奥山吉彦, "PWM 인버터의 서지전압과 전동기 절연", *電氣學會論文誌D*, Vol.119, No.4, pp.508-514, 1999
- [3] L. Gubbala and A. von Jouanne, P. Enjeti, W. Gray, C Singh, H. Toliyat, "Voltage Distribution in the Windings of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages", *IEEE/PESC Record*, pp.579-585, 1995
- [4] Austin H. Bonnett, "Analysis of the Impact of Pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.32, No.2, pp.386-392, 1996
- [5] Juergen K Steinke, "Use of an LC Filter to Achieve a Motor-friendly Performance of the PWM Voltage Source Inverter", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 649-654, Sep./Oct., 1999