인버터 구동에 따른 고압전동기 사고사례와 대책

최영찬, 우명호
현대중공업(주) 기계전기연구소

Failure Case-Study and Countermeasures of High-Voltage Motor with Inverter Drive System

Young-Chan Choi, Myung-Ho Woo
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

ABSTRACT

Recently, the insulation breakdown accident has been experienced at 6.6kV inverter driving motor. That brought about the reliability degradation of 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. We clarify the cause of the deterioration of the inverter driving motor through the analysis of insulation breakdown accidents.

1. 서 론

근년 정밀한 속도와 토오크 제어를 위해서 인버터 사용이 급증과 함께 스위칭주파수도 점점 높아지는 추세에 있으며, GTO(gate turn-off thyristor) type, IGBT(insulated gate bipolar mode transistor) type 등의 사용이 확대되고 있다. 이러한 인버터는 부하 운전을 원활하게 하며 또한 기계의 효율성이 뛰어나며 저소음 운전을 가능하게 한다. 그러나 높은 스위칭주파수로 인하여 써지전압을 발생하게 되고, 결과적으로 전동기 입력단에 급준한 써지전압을 인가하여 권선사고를 유발시키는 원인이 되고 있다.

인버터를 구성하는 스위칭소자는 나날이 고속화되어가고 있는 추세에 있으므로 부하인 전동기 입력단에서의 써지(Surge)전압은 충분히 검토되어야 하며, 전동기 입력측에서도 기기수명을 좌우하는 절연이 무엇보다 중요하여 절연보강과 진공가압 함침방식의 적용 등을 통하여 내전압특성을 향상시켜 절연파괴사고를 최소화하려는 노력이 이루어지고 있다[1]. 그리고 직렬 리액터 등의 설치로 인버터 출력 써지전압의 크기를 감소시키려는 연구가 진행되고 있다[2]. 고압전동기에 대한 인버터 구동 필요성도 점점 증대되고 있으므로 절연사고에 대한 원인규명과 함께 써지전압의 억제대책과 전동기절연의 내전압 특성 향상의 두가지 측면을 통합한 차원에서의 검토가 필요하지만 아직까지는 이와 같은 노력이 부족하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 인버터구동 고압전동기의 사고 및 조치사례에 대하여 소개하고, 유형분석을 통하여 인버터 구동에 따른 절연파괴사고 발생 메카니즘을 추정하였다. 또한 이와 같은 절연사고를 미연에 방지하고 전동기의 내구성을 향상시키기 위하여 고압전동기의 내전압특성 향상을 위한 절연시스템 보강방안 및 전동기 입력단에서의 써지전압 저감을 위한 필터회로 설계방안, 적용예에 대하여 서술하였다.

2. 인버터구동 고압전동기 사고 및 조치사례

2.1 인버터 구동회로

당사에서 적용한 6.6kV 고압전동기 인버터구동 시스템은 그림 1과 같다. 이 시스템은 GTO type, 2Level 저압인버터를 사용하였으며, 660V/6.6kV Step-up Transformer로 전압을 상승시켜 전동기의 입력전원으로 사용하였다.

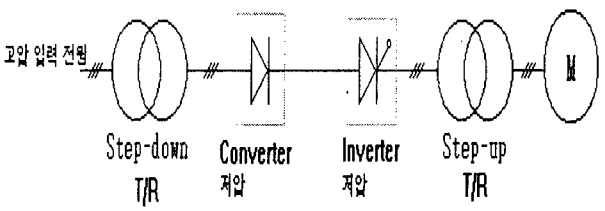

그림 1 고압전동기 적용 인버터구동회로
Fig. 1 Inverter circuit applied high voltage motor

2.2 고압전동기 사고사례

그림 2, 3은 실제 운전중에 발생한 인버터구동 고압전동기 절연파괴 사고형상을 나타낸다. 그림 2는 사고코일의 엔드부 형상이며, Lead Cable이 연결된 코일Group의 첫 번째 코일과 두 번째 코일에서 과열로 인한 절연물의 심한 변색이 확인되었다. 그림 3은 절연파괴사고가 발생한 부위를 나타내며, 고정자 슬롯내부에서 대지간 절연파괴로 나타났다.

그림 2 절연사고 전동기 코일(엔드부)
Fig. 2 Motor coil of the insulation accident (end part)

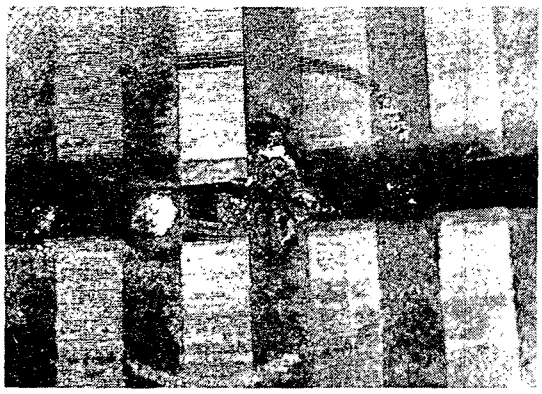

그림 3 절연사고 전동기 코일(슬롯부)
Fig. 3 Motor coil of the insulation accident (slot part)

인버터 구동전동기에 대한 국제규격은 극히 제한적이며, 대표적인 것이 NEMA MG1, Part 31 이라고 할 수 있으며, 규격에서는 600V이상의 고압전동기에서 Rising Time을 1㎲이상, 피이크전압(Vp-p)을 2.5pu 이내로 규정하고 있다. 그러나 인버터 출력전압의 스위칭시 발생하는 써지전압은 선로정수에 의해 중첩, 상승하여 전동기입력단에서는 측정한 결과, Vp-p가 20kV를 넘는 것으로 측정되었다. 이것은 NEMA규격에서 규정하고 있는 값(6.6kV시스템인 경우 13.47kV이내)을 초과하고 있다는 것을 알 수 있다.

위 고압전동기는 써지전압에 내력을 갖도록 제작당시 턴절연을 11kV급으로, 대지절연을 6.6kV급으로 제작하였으나 운전후 6개월시점에 절연파괴사고를 발생하였으며, 절연시스템 전체를 13.8kV급으로 처리하였으나 2년 2개월 시점에 절연사고를 일으켰다. 이것은 인버터 구동에 따른 고려사항이 Vp-p만이 아니라는 것을 나타내고 있다. 최종적으로는 저압전동기(690V)로 교체하였고, Step-up Tr.을 사용하지 않고 전동기절연은 3.3kV급으로 처리하였다.

표 1 절연시스템 구성

	설계	수정	최종
턴절연	4turn	6turn	3turn
대지절연	8turn	16turn	6turn
코일크기	2.5×4.9 2Reels	2.9×4.0 2Reels	2.7×6.0 6Reels
슬롯크기	15×80	15×98	15.5×82

2.3 절연파괴 메커니즘 추정

인버터 구동의 경우 급준한 써지전압에 의해 전동기 코일간의 분담전압은 균일하지 않게 되고, Lead 케이블에 인접한 코일에 집중하여 전압이 분포되고, 첫째턴의 분담율이 60%까지 이르게 되어 각 코일의 전류밀도에 불균형을 초래한다[3-4]. 결과적으로 그림 2의 사고코일의 엔드부 형상으로부터 반복되는 써지전압으로 인해 소선절연이 damage를 입고 턴간 layer short가 발생하여 과전류로 인한 overheating으로 인해 절연물이 심하게 변색되었으며, 결과적으로 절연내력이 급격히 감소하여 절연파괴사고로 이어졌다고 볼 수 있다. 이것은 견고하고 무보수화를 위하여 유도전동기를 사용하고 있는데 이로 인한 신뢰성 저하는 치명적이라고 할 수 있다.

이 열화과정을 정리하면,

인버터스위칭써지→과전압→부분방전→유기물의 침식→턴간 layer short→과전류→온도상승→Overheating→절연물 경화(변색)→절연내력저하→상간, 대지간 절연파괴사고로 이어졌다.

2.4 절연시스템 보강방안

인버터구동 전동기의 경우 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 고압절연시

스템의 한계와 소형경량화에 대한 요구 등을 고려할 때 적절한 방법이라고 할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 고압전동기 턴간 전압분담을 고려하여 그림 4와 같이 전동기단에서의 절연시스템 강화 대책에 대하여 제안한다.

방법으로는 절연파괴사고분석을 통하여 Lead 케이블에 인접한 코일의 제 1턴을 내전압성이 뛰어난 절연테이프(Kapton)로 절연보강 처리함으로서 턴간 Layer short를 극력 억제하여 내부분방전성을 향상시키고, 소선간의 절연파괴는 결과적으로 대지간의 절연파괴로 이어지므로 대지절연은 11kV 고압전동기 절연시스템을 적용한다.

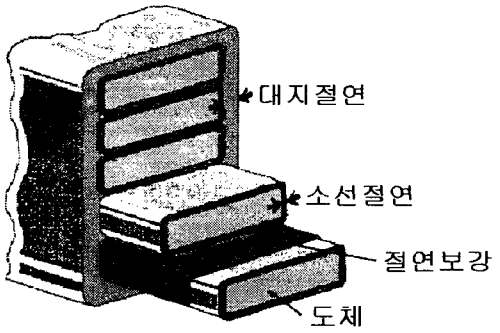

그림 4 절연보강후 코일단면
Fig. 4 Cross section after insulation reinforcement

3. 댐핑회로에 의한 과전압 억제

3.1 과전압 발생의 억제

전동기 입력측의 과전압 발생을 저감 혹은 억제하기 위한 방법으로는 인버터 출력 전압의 기본파 성분만을 전동기에 인가하기 위해 인버터 출력단에 설치되는 정현파 필터 방식과 전압반사 현상에 의한 과전압 발생 억제를 위해 전동기 입력단에 설치되는 Terminator 방식으로 크게 대별할 수 있다.

정현파 필터 방식의 경우, 전동기의 절연 열화원인 제거로 인해 전동기 절연 측면에서 볼 때 가장 이상적인 해결방법으로 제시되고 있는 반면, 필터에서의 전압 강하로 인한 전동기 제어 범위의 축소, 인버터 시스템의 가격 상승 등의 부수적인 문제를 발생시키고 있다.

Terminator 방식은 전압반사 현상에 의해 인버터 출력 PWM 전압에 중첩되는 과도전압 성분의 발생 억제를 목적으로 한다. 이 방식은 가격 측면에서 정현파 필터에 비해 매우 유리한 장점을 가지고 있는 반면, 인버터-전동기간 케이블의 특성 임피던스 정보의 정확성에 따라 과전압 억제 특성이 변화하기 때문에 설계단계에서부터 이에 대한 고려가 필요한 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 한편 이 방식의 적용을 통해 과전압이 억제된다고 하더라도 전동기에는 PWM 전압이 인가되기 때문에 전동기의 절연 측면에서 볼 때 절연 열화의 진행 속도가 완화되었을 뿐 여전히 전동기의 절연에는 악영향을 미친다고 할 수 있다.

3.2 고압인버터의 과전압특성 및 댐핑회로

그림 5에 전동기 써지전압 억제용 댐핑회로를 포함한 고압인버터 시스템의 전체 전력회로를 나타내었으며 부록의 표 2및 3에 유도전동기 및 변압기의 사양을 각각 나타내었다.

출력변압기의 존재는 기존 Terminator의 적용을 매우 어렵게 할 뿐만 아니라 본 시스템과 같이 변압기의 누설 인덕턴스가 클 경우에는 전동기의 써지전압 특성에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서

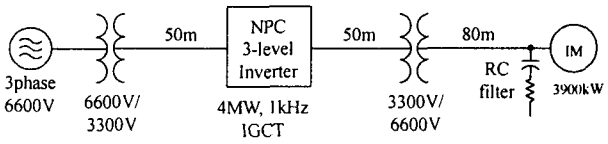

그림 5 고압 대용량 인버터 시스템
Fig. 5 High-voltage large-capacity inverter system

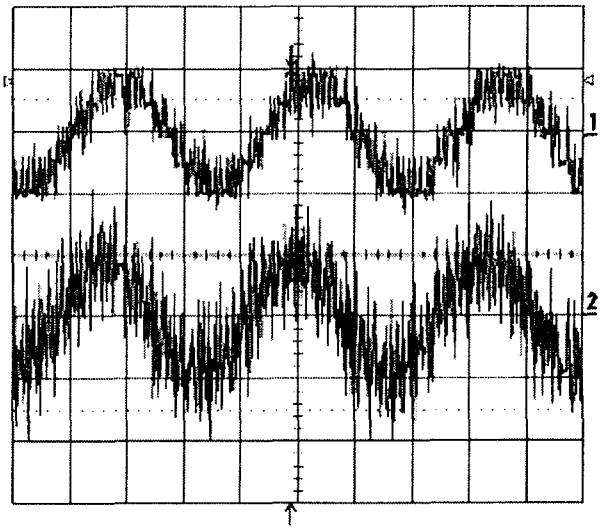

그림 6 댐퍼 설치전의 시험파형(5ms/div)
인버터 출력전압(상) : 5kV/div
전동기 입력전압(하) : 10kV/div
Fig. 6 Experimental results without damper (5ms/div)
Inverter output voltage(upper trace) : 5kV/div
Motor input voltage(upper trace) : 10kV/div

케이블의 특성임피던스에 정합된 Terminator 설계 방법은 본 시스템의 과전압 억제방법으로 적당하지 않으며 별도의 억제 방법이 요구되고 있다.

이를 위해 그림 5와 같이 RC 필터를 설치하여 변압기의 누설 인덕턴스와 RC 필터가 L-R-C필터 구조를 형성하도록 하였다.

그림 6과 7에 RC 필터 설치 전 및 후의 실험 파형을 각각 나타내었다. 그림 6의 전동기 입력전압의 최대치는 20kV 이상으로서 전동기 정격전압의 3배 이상의 전압이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 값은 NEMA 규정안을 초과하는 값으로서 전술한 바와 같이 전동기 권선부의 소손을 초래할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 그림 7은 RC 필터를 설치하였을 때의 직류전압, 전동기 입력전압, 그리고 인버터 출력전압 파형으로서 전동기 입력전압의 최대치가 10kV, 즉 NEMA의 최대전압 규제안 이내인 1.5pu로 저감되었음을 확인할 수 있다.

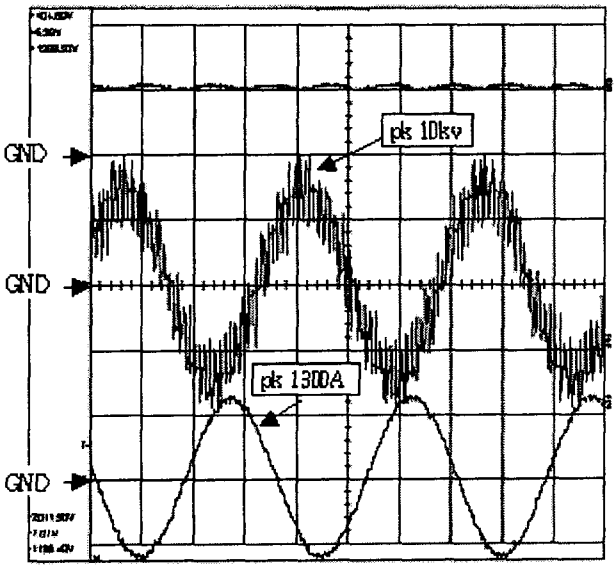

그림 7 댐퍼 설치후의 각부 파형(5ms/div)
직류전압(상) : 2kV/div
전동기 입력전압(중) : 5kV/div
인버터 출력전류(하) : 1kA/div

Fig. 7 Experimental results with damper (5ms/div)
Dc-link voltage(upper trace) : 2kV/div
Motor input voltage(middle trace) : 5kV/div
Inverter output current(upper trace) : 1kA/div

4. 결 론

본 논문에서는 근년 문제시되고 있는 인버터구동 고압전동기의 절연파괴사고 메카니즘 규명과 대책방안에 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 확인하였다.

2) 인버터구동 고압전동기 절연파괴사고를 미연에 방지하기 위한 대책으로, 전동기 절연시스템의 내전압성 향상을 통한 절연보강과 필터 설치를 통한 써지전압의 억제대책에 대하여 제안하였다.

참 고 문 헌

[1] 森安正司, 奥山吉彦, "PWM インバータのサージ傳搬と電動機電壓", 電氣學會論文誌D, Vol. 119, No. 4, pp. 508-514, 1999.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

부 록

표 2 전동기 파라미터

용량	3900 kW
정격전압	6600 Vac
정격전류	418 A
극수	12
정격속도	592 rpm
1차측 동손	0.0580 Ω
2차측 동손	0.0486 Ω
1차측 누설 리액턴스	1.2517 Ω
2차측 누설 리액턴스	1.1804 Ω
자화 리액턴스	31.4738 Ω

표 3 변압기 파라미터

결선 방식	Δ-Y
용량	6.5 MVA
% 임피던스	12 %
2차측 누설 인덕턴스	4.2 mH
2차측 동손	0.1398 Ω