

# 순간전압강하가 3상 유도전동기에 미치는 영향 검토

(Investigation of the Impact of Voltage Sags on 3-Phase Induction Motors)

강봉석 · 김재철 · 문종필 · 윤상윤\*

송실대학교 · LG산전\*

(Bong-Seok Kang, Jae-Chul Kim, Jong-Fil Moon, Sang-Yun Yun\*)

## Abstract

This paper describes the various characteristics of voltage sags which can affect the functions of three-phase induction motors that are mostly used in the power distribution systems. These assorted characteristics include motor speed losses, voltage recovery, motor reacceleration, and transient characteristics. An experimental study on the induction motor behaviors was also carried out to confirm these impacts. In addition, sequential voltage sags with short durations were considered and investigated. The results show that the occurrence of the second voltage sag after the first one may affect the induction motor adversely.

## 1. 서 론

전력품질 문제는 크게 전압품질 문제와 주파수품질 문제로 나눌 수가 있으며, 전압품질은 순간전압강하(Voltage Sag), 순간정전(Memporary Interruption), 영구정전(Sustained Interruption) 등으로 나눌 수가 있고, 주파수 품질 문제는 고조파, 과도전류 등으로 나눌 수가 있다.

현재까지 이런 전력품질 문제들은 전동기 보호연구에 거의 포함되지 않았다. 외국의 경우 이런 문제들에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나, 국내의 경우는 거의 전무한 상태이다[1,2]. 또한 최근에는 디지털 장비같은 민감한 장비들이 늘어나고 있는 추세이므로 더욱 이런 전력품질 문제의 중요성이 대두되고 있다.

본 논문은 전력품질 문제중 전압품질문제만 국한하여 서술하였다. 배전계통에서 일어날 수 있는 사고에는 1선지락, 선간단락, 2선 지락, 3선지락(단락)이 있다. 순간전압강하와 순간정전은 이와 같은 배전계통의 사고에 의해 일어날 수 있다. 이와 같은 대부분의 사고유형을 검토하였고, 순간전압강하 및 순간정전이 배전계통에 3상 부하설비로서 가장 널리 사용되는 3상 유도전동기에 미칠 수 있는 영향을 종합적으로 분석하였다.

또한, 국내 배전계통에서의 사고는 영구사고보다는 일시사고가 대부분이기 때문에, 일시사고 제거용으로 리클로저를 채택하고 있다. 따라서 차단기나 리클로저에 의한 리클로징에 의해 수용가는 연속적인 순간전압강하를 경험할 수 있다[1]. 본 논문은 두 번의 순간전압

강하가 수용가에 미치는 영향을 검토하였다.

전압품질의 실질적인 현상을 분석하기 위해 실험을 실시하였다. 순간전압강하는 3상 전원시뮬레이터(AA-2000XG)를 이용하여 유도전동기에 인가하였다.

## 2. 유도전동기의 전압품질 문제

### 2.1 배전계통의 사고에 의한 순간전압강하

먼저 국내 배전계통은 3상 4선식 중성점 다중접지 방식을 적용하고 있다. 계통에 발생할 수 있는 사고의 종류에는 1선지락, 선간 단락, 2선 지락, 3상 지락, 3상 단락이 있다. 그중에 가장 빈번히 발생하는 사고유형은 1선지락이다.

1선지락의 경우, 사고가 난 피더의 지락된 상의 전압은 사고가 제거되기전까지 0이 될 것이다. 사고난 피더의 모선전압도 떨어진다. 따라서 모선에 연결된 다른 피더도 순간전압강하를 경험하게 된다. Y- $\Delta$ 계통에서는 고압측의 단상 순간전압강하는 저압측으로 변환시 30°의 위상차를 가진 2상 순간전압강하가 된다[4]. 즉, 1선지락에 의해 어떤 수용가는 불평형의 2상 순간전압강하를 경험할 수 있다.

2상지락이 계통에 발생하면, 지락된 두상의 전압은 순간적으로 0으로 떨어질 것이고, 다른 피더의 두상의 전압도 같은 크기로 감소하지만, 위상의 변화는 없다. 그러나 선간단락의 경우, 사고가 난 피더에서는 사고난 두상은 같은 위상이 되고 전압은 감소한다. 지락이 아

닌 이상 0으로 떨어지지지는 않지만, 이때 모선에 연결된 다른 피더에서는 위상변위(phase jump)가 발생하며, 두 상의 전압의 크기가 서로 다르게 된다. 이 경우에 매우 심한 불평형이 발생한다.

3상사고(지락 및 단락)의 경우, 사고가 발생한 피더는 사고가 제거되기까지 3상의 전압은 0으로 유지될 것이다. 3상사고는 수용가 설비들에 심각한 영향을 미칠수 있을뿐만 아니라 계통 안정도면에서도 가장 최악의 사고로 인식된다.

본 논문에서는 1선지락, 2선지락, 3상지락 및 단락이 선로에 발생했을때, 사고피더와 같은 모선에 연결된 다른 피더의 입장을 고려하여 실험을 수행하였다. 또한 모든 사고는 평형사고라 가정하였다.

## 2.2 순간전압강하가 유도전동기에 미치는 영향

### 2.2.1 사고 순간전압강하와 전압회복

계통에서 사고의 위치, 형태, 사고제거시간, 계통의 구성 등에 따라 순간전압강하와 사고후 전압회복은 다른 양상을 보이게 된다. 앞서 서술하였듯이 3상 사고가 계통에 가장 심각하게 영향을 미치며, 1선지락, 선간단락, 2선 지락도 적지않은 영향을 미친다[3]. 전압강하가 발생하면 피더에 연결된 전동기와 전동기에 연결된 다른 부하들 또한 영향을 받게된다. 사고 제거후 전압은 다시 정격전압으로 회복되고 부하단에 연결된 모든 설비들이 재가동을 할 것이다. 특히, 3상 유도전동기의 경우 준-기동현상(기동전류)이 발생하고 이 회복 과정에서 전체적으로 모선전압이 흔들리는 현상이 발생한다 [4]. 본 논문에서는 순간전압강하후 회복시 발생하는 기동현상 및 전류를 준-기동현상 및 전류라 하겠다.

### 2.2.2 전동기 속도 손실

전동기가 정상상태(steady-state)에 있다고 가정하면, 순간전압강하 발생시 유도전동기 단자전압에 비례하여 모터의 토크는 감소되고 슬립(slip)과 전류는 증가할 것이다. 관성이 낮은 부하가 연결되었을 경우 급격하게 속도가 줄어들고, 모터의 출력은 감소할 것이다. 따라서 펌프, 압축기, 송풍기와 같은 저감토크 특성의 전동기는 사고후 정상적인 상태로 회복하기 힘들어지게 된다.

### 2.2.3 전동기 재가속

사고제거후 초기의 속도 손실과 회복전압의 크기에

따라서 전동기의 재가속은 다른 양상을 보인다. 또한 전류는 그때의 속도와 기동전류 특성에 따라서 달라질 것이다. 전동기의 기동전류는 전압의 빠른 회복을 방해하게 된다. 전동기들은 초기 순간전압강하 발생시 서로 다른 양상을 보이며, 따라서 재가속시 서로 다른 비율을 가지면서 정상상태로 회복할 것이다.

또한 재가속이 되는 순간 기동전류에 의해 유효전력과 무효전력은 갑작스럽게 증가하게 된다. 어느 피더에 산업용 공장과 같은 유도전동기가 다수 설치된 수용가가 많다고 가정한다면, 사고제거후 유도전동기들은 거의 동시에 재가속을 할 것이고 그 피더는 전체적으로 전력이 부족하게 될 것이다. 결국 계통의 안정도 측면에서 큰 충격이 될 수 있다[3].

## 2.2.4 과도 특성

비록 수십 ms 정도로 짧은 지속시간이라도 갑작스런 전압 변화에 의해서 유도전동기에 과도현상이 발생하게 된다. 전압이 갑작스럽게 떨어지면 자속이 순간적으로 줄어들고 3상 단락회로가 형성된다. 전원측으로부터 공급받던 지상무효전력도 줄어들게 된다. 즉각적으로 정격토크의 약 5배정도로 감소된 과도-토크가 발생하며, 전동기 전류는 대체적으로 정격의 10배정도 크기로 증가하게 된다[3]. 다시 전압이 정상상태로 회복되는 순간, 토크에 과도현상이 발생하고, 전류에 준-기동현상이 발생한 후 정격치로 회복된다. 이러한 과도토크와 과도전류는 유도전동기의 절연, 회전축 등에 직접적인 충격을 가할 것이다.

산업 현장에 수십 ms에서 1[min]정도의 순간전압강하가 발생한다면, 전체적인 생산공정은 정지될 것이다. 대부분의 전압에 민감한 장비들은 트립될 것이고 전동기 또한 정지하게 되며 전력공급이 재개되는 순간 재가속 현상이 발생할 것이다.

순간전압강하 발생시 유도전동기를 계속 운전하는 것은 유도전동기를 정지시킨 후 다시 재가속하는 것보다 계통의 안정도 관점에서 이점이 있을수 있다. 즉, 사고가 발생하는 동안 속도조절장치나 전자접속기와 같은 장비들이 탈락 되는 것을 피할 수가 있고, 결국 유도전동기 재가속시 기동전류 발생을 줄일 수 있으므로 계통의 충격 또한 감소한다. 하지만 두가지 경우 모두 준-기동현상이 발생할 것이다[3].

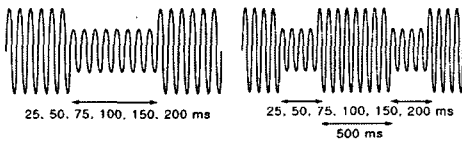
## 3. 3상 유도전동기 실험

본 실험에는 4극, 1/3HP, 60Hz, 220V의 소형 농형유도전동기가 사용되었다. 또한 다이내모미터를 유도전동

기의 축에 연결하여 부하로서 작용하게 하였다. 순간전압강하의 발생은 6[kW]의 3상 전원시뮬레이터를 사용하였다. 이밖에 각종 파라미터를 측정하기 위하여 4채널 디지털 오실로스코프, 타코메터, 토크메터가 사용되었다. 다이ना모메터에 직류전압을 인가하면 유기기전력이 나타나고 이것은 곧 전동기의 속도의 함수이므로 측정하여 유도전동기의 속도변화를 확인하였다.

### 3.1 실험 구성 및 사례

실험은 그림 1와 같이 크게 두가지 사례로 나누어 볼 수가 있다. 한번의 순간전압강하만을 평가한 단독 이벤트, 순간전압강하가 두번 인가되는 연속 이벤트로 분류하고, 이벤트 지속시간을 변화시키면서 각각의 영향을 평가하였다. 연속 이벤트에서 한번에 이벤트후 500 ms 후에 다음 이벤트가 인가되도록 설정하였다.



(a) 단독 이벤트 (b) 연속 이벤트  
(a) Single event (b) Double event

그림 1. 실험에 인가된 순간전압 파형  
Fig. 1. Types of the event voltage waveform

표 1. 실험 케이스  
Table 1. Experiment cases

Case	전압강하 횟수	부하 상태	전압강하 [%]	전압강하 지속시간[ms]
Case1	1회	무부하	0, 10, 20, ..., 90	25, 50, 75, 100, 150, 200
Case2				
Case3				
Case4				
Case5				
Case6	2회	85%	0, 10, 20, ..., 90	25, 50, 75, 100, 150, 200
Case7				
Case8				
Case9				

단독 이벤트의 경우, 무부하와 85%부하를 걸었을 경우로 나누어 실험하였고, 연속 이벤트의 경우는 85%부하만 걸어 실험하였다. 또한 각 케이스에서 전압강하는 0~90%까지 10% 단위로 변화시켜 각각 인가하였다. 표 1은 본 논문의 실험케이스를 나타낸다.

## 3.4 실험 결과

### 3.4.1 무부하시 단독 이벤트

그림 2는 30%의 크기와 100 ms 지속시간을 가지는 순간전압강하가 R상에 발생하였을 경우의 전압, 전류

및 다이나모메터의 유기기전력을 보여준다. 무부하시 정격전류는 약 0.5[A]이다. 순간전압강하가 인가되면 전동기는 순간적인 과도현상이 일어나 높은 전류가 흐름을 알수가 있다. 전압이 회복되는 순간 전동기는 재가속하게 되고 기동전류가 다시 흐르게된다. 전류는 이벤트 기간중 4~5배정도 증가하며 이 증가한 전류에 의해서 전동기는 더욱 큰 전력을 필요로 하게 된다.

그림 3는 각 케이스의 지속시간과 전압강하의 크기에 따른 최대 전동기 감소 속도를 나타낸다. 이 그래프를 통하여 순간전압강하의 크기와 지속시간에 따른 전동기 속도변화를 쉽게 알수가 있다. 이벤트 지속시간이 길수록, 전압강하가 클수록 속도는 더욱 떨어진다. R상이 전압강하된 경우보다 R·S상이 강해되거나, R·S·T상이 모두 전압강하된 경우에 더 큰폭으로 감소하였다.

### 3.4.2 85%부하시 단독 이벤트

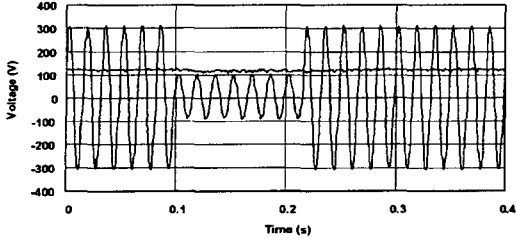
그림 4은 85% 부하시 순간정전이 100 ms동안 R상, R·S상, R·S·T상에 각각 발생한 경우의 전압과 전류를 보여주고 있다. 그림 4와의 차이점은 무부하가 아닌 85%의 부하가 걸렸다는 점과 전압이 0%로 감소했다는 것이다. 정격전류는 약 0.85[A]이며 전체적으로 기동전류의 지속시간은 더 길어졌음을 알수가 있다. 즉 부하가 걸렸을 경우가 무부하 운전시보다 사고가 발생하면 전동기의 관성에 의해 더욱 심하게 속도와 토크가 떨어지는 것을 알수가 있다.

이벤트 발생시 전동기 속도는 정격속도(1780[rpm])의 반이상으로 떨어지며, 토크도 또한 심하게 감소한다. 재가속시 기동전류는 더욱 커지고 무부하의 경우에 비해 긴 시간동안 지속된다.

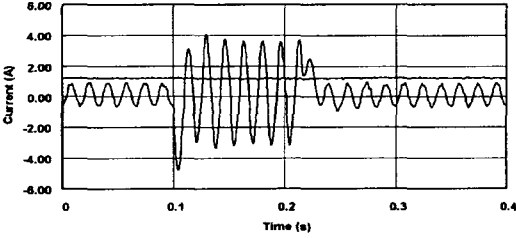
그림 5은 각 케이스의 지속시간과 전압강하의 크기에 따른 최대 전동기 감소 속도와 최대 감소 토크를 나타낸다. 무부하일 경우보다 더욱 큰 비율로 속도와 토크가 감소하였다. R·S·T상 순간전압강하가 90%~50%정도인 경우에 속도와 토크가 다소 큰 폭으로 떨어진다. 이에 비해, R·S상 순간전압강하의 경우는 40%이하부터 큰 영향을 받는다.

### 3.4.3 85%부하시 연속 이벤트

그림 6은 70%의 연속 순간전압강하가 발생한 경우의 전압과 전류 파형을 보여주고 있다. 한번의 전압강하 발생후 0.5초후에 다시 전압강하가 발생하도록 가정을 하였다. 여기서 0.5초는 우리나라 배전계통 보호협조시 리클로저의 최소 리클로징 시간을 의미한다.



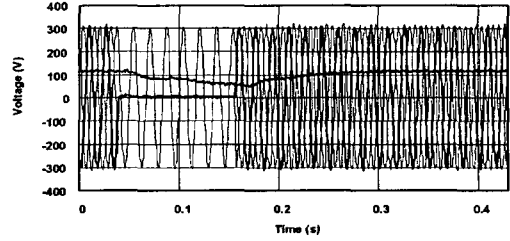
(a) 전동기의 단자전압 (R상 순간전압강하시)  
(a) Terminal voltage (sag in phase R)



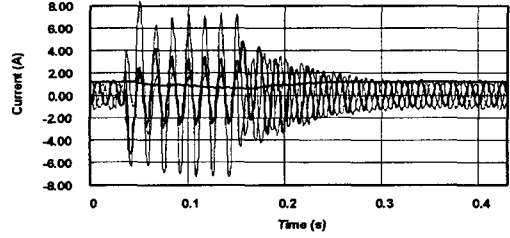
(b) 전동기 전류 (R상 순간전압강하시)  
(b) Line current (sag in phase R)

그림 2. 무부하, 30% 단독 순간전압강하 발생시 전압과 전류 파형

Fig. 2. Single-sag voltages and currents for voltage sag to 30% for no-load motor



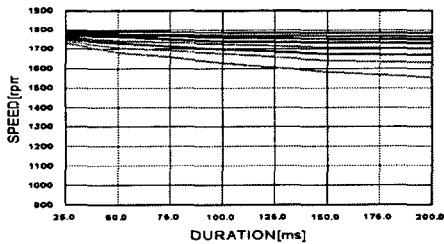
(a) 전동기 단자전압 (R, S상 순간전압강하시)  
(a) Terminal voltage (sag in phase R and S)



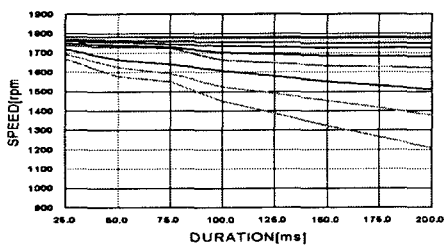
(b) 전동기 전류 (R, S상 순간전압강하시)  
(b) Line current (sag in phase R and S)

그림 4. 85%부하, 순간정전발생시 전동기 단자전압과 전류 파형

Fig. 4. Motor terminal voltage and line current for single temporary interruption with 85% rated motor load



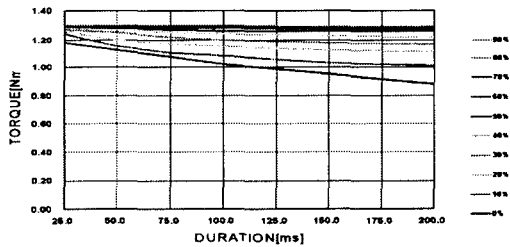
(a) 단상 순간전압강하 발생시 (R상)  
(a) When a single-phase voltage sag occurred (in phase R)



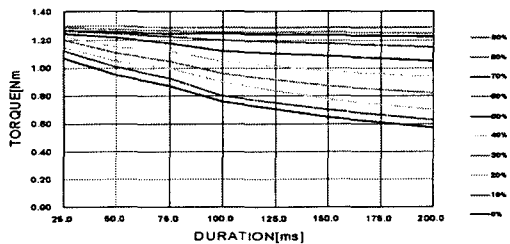
(b) 2상 순간전압강하 발생시 (R, S상)  
(b) When a two-phase voltage sag occurred (in phase R, S)

그림 3. 무부하시 전동기 속도의 변화

Fig. 3. Variations of motor speed for no-load motor



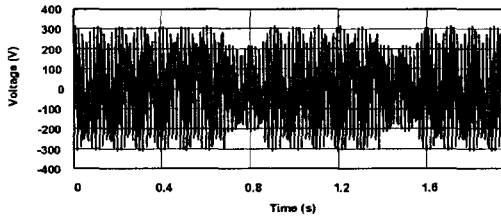
(a) 단상 순간전압강하 발생시 (R상)  
(a) When a voltage sag in phase R occurred



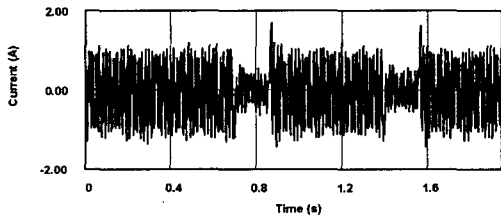
(b) 3상 순간전압강하 발생시 (R, S, T상)  
(b) When a voltage sag in three phases (R, S, T) occurred

그림 5. 85% 부하시 전동기 토크의 변화

Fig. 5. Variations of motor torque with 85% rated motor load



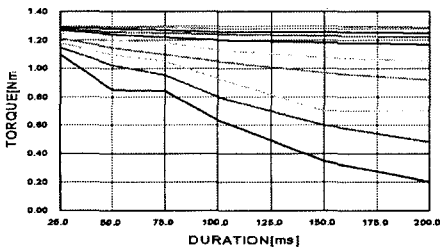
(a) 전동기의 단자전압 (R상 순간전압강하시)  
(a) Terminal voltage (sag in phase R)



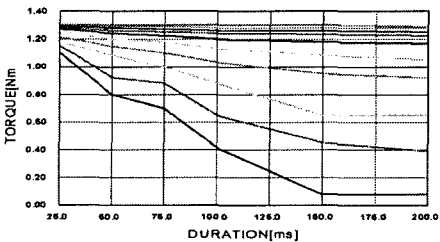
(b) 전동기 전류 (R상 순간전압강하시)  
(b) Line current (sag in phase R)

그림 6. 85% 부하, 30% 연속 순간전압강하가 150ms 동안 발생시 전압과 전류 파형

Fig. 6. Sequential voltage sag to 30% during 150 ms in phase R with 85% motor rated load



(a) 첫 번째 순간전압강하시  
(a) First voltage sag



(b) 두 번째 순간전압강하시  
(b) Second voltage sag

그림 7. 2상 연속 순간전압강하 발생시 전동기 토크의 변화 (R, S상)

Figure 7. Variations of motor torque for sequential voltage sags in two phases (R, S)

실험결과, 첫 번째 전압강하후 두 번째 전압강하가 발생할때 토크는 더욱 떨어지는 것으로 나타났다. 그림 7에서 (a)는 첫 번째 순간전압강하 발생시 최대 감소 토크를 (b)는 0.5[s]후 재차 순간전압강하가 발생했을때 최대 감소 토크를 나타낸다. 그림 7에서 볼수 있듯이 두 번째 순간전압강하시에 전동기 토크가 훨씬 더 많이 떨어지는 것을 알수가 있다.

#### 4. 결 론

어떤 원인에 의해 순간전압강하가 3상유도전동기에 인가되면, 생산공정이 정지될수 있으며 막대한 비용손실을 초래할수 있다.

본 논문은 3상 순간전압강하와 2상 순간전압강하 뿐만 아니라 계통에서 가장 발생빈도가 높은 단상 순간전압강하까지 고려하였다. 또한, 순간전압강하 발생시 3상 유도전동기에서 일어나는 여러 현상을 정리하였다. 이런 현상들을 실증실험을 통하여 평가 및 확인하였고 리클로저의 리클로징 시간에 의해 연속적으로 발생할수 있는 순간전압강하의 영향을 평가하였다.

실험결과, 3상 전압강하와 2상 전압강하가 가장 심각한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 연속 순간전압강하가 발생하면 전동기에 상당한 충격이 있을것이다. 선간 단락사고 등에 의해 나타날 수 있는 불평형 순간전압강하에 대해서 추후의 연구가 필요할것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(02-중-03) 주관으로 수행된 과제임

#### 참 고 문 헌

- [1] 김재철 외, "순간전압강하에 의한 수송가속 영향의 현황 분석", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 12권 4호, 1998년.
- [2] Math H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems(Voltage Sags and Interruptions)", IEEE Press, 2000.
- [3] J.C.Das, "Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors", IEEE Trans. on Industry Application, vol. 26, no. 4, July/August, 1990.
- [4] Juan C.Gomez, Medhat M. Morcos, Claudio A. Reineri, and Gabriel N. Campetelli, "Behavior of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 2, April 2002.
- [5] IEEE Std. 1250-1995, IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances.