

배전계통 순간전압강하 및 순간정전이 3상 유도전동기에 미치는 영향 검토

강봉석*, 김재철*, 문종필*, 윤상윤*
*숭실대학교 *LG 산전

Investigation of the Impact of Voltage Sags and Temporary Interruptions on 3-Phase Induction Motors

Bong-Seok Kang*, Jae-Chul Kim*, Jong-Fil Moon*, Sang-Yun Yun*
*Soongsil University *LG Industrial Systems

Abstract - This paper describes the various characteristics of voltage sags and temporary interruptions which can affect the functions of 3-phase induction motors. These assorted characteristics include motor speed loss, voltage recovery, motor reacceleration, and transient characteristics. An experimental study on induction motor behavior was also carried out to confirm these impacts. Besides, sequential voltage sags of short duration were considered for this paper. 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 1선 지락, 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 산업용 전동기인 3상 유도전동기에 미칠 수 있는 영향을 종합적으로 분석하였다.

또한, 국내 배전계통에서의 사고는 영구사고보다는 일시사고가 대부분이기 때문에, 보호용으로 리클로저를 채택하고 있다. 따라서 리클로저에 의해 수용가는 연속적인 순간전압강하를 경험할 수 있다[1]. 본 논문은 두 번의 순간전압강하가 수용가에 미치는 영향을 검토하였다.

전압품질의 실질적인 현상을 분석하기 위해 실험을 실시하였다. 순간전압강하는 3상 전원시뮬레이터(AA-2000XG)를 이용하여 발생시켰고, 이벤트 전압은 정격전압의 0%~90%까지 변화시켜 인가하였다. 또한, 본 논문에서 순간전압강하 90%라 함은 정격의 10% 감소한 전압을 의미한다.

2. 유도전동기의 전압품질 문제

2.1 배전계통의 사고에 의한 순간전압강하

배전계통에서의 전압품질문제는 서지, 계통 사고, 스위칭, 전동기 기동, 변압기タップ변환 등 여러 가지 요인에 의

해 발생될 수 있다[5]. 그 중 계통사고에 의한 문제를 분석하였다.

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 제거되기까지 0이 될것이다. 사고난 피더의 모선전압도 떨어진다. 따라서 모선에 연결된 다른 피더도 순간전압강하를 경험하게 된다. Y- Δ 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, 단락된 두상의 전압은 순간적으로 0으로 떨어질것이고, 다른 피더의 두상의 전압도 같은 크기로 감소하지만, 위상의 변화는 없다. 그러나 선간단락의 경우, 사고가 난 피더에서는 사고난 두상은 같은 위상이 되고 전압은 감소한다. 지락이 아닌이상 0으로 감소하지는 않지만, 이때 모선에 연결된 다른 피더에서는 위상변위(phase jump)가 발생하며, 두상의 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 유지될것이다. 3상사고는 수용가 설비에 심각한 영향을 미칠수 있을 뿐만 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

순간전압강하 및 순간정전에 의해 유도전동기는 정지하거나 유도전동기에 연결되는 부하들을 정상전압으로 회복하지 못할수도 있다. 이런 현상은 많은 요소들이 상호적으로 관련되었으며, 다음과 같이 정리를 하였다.

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 다시 가동을 할 것이다. 특히, 3상 유도전동기의 경우 준-기동현상이 발생하여 순간적으로 높은 기동전류가 흐르게 되고 이 회복되는 과정에서 전체적으로 모선전압이

흔들리는 현상이 발생한다[4]. 본 논문에서는 순간전압강하 후 회복시 발생하는 기동현상 및 전류를 준-기동현상 및 전류라 하였다.

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 사고 후 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 중급발전 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.

산업체 현장에 약 수십[ms]에서 1[min]정도의 순간전압강하 및 순간정전이 발생한다면, 전체적인 생산공정은 정지될 것이다. 대부분의 민감한 장비들은 계통으로부터 탈락될 것이고 전동기를 계속 운전하는 것은 불가능하게 된다. 따라서 유도전동기의 연결이 끊어질 것이고 전력 공급이 재개되는 순간 재가속 현상이 발생할 것이다. 결국 이 문제는 hot-load pickup을 어떻게 조절하고 감소시킬 것인가에 대한 문제가 된다[4].

순간전압강하나 순간정전이 발생하는동안 유도전동기를 계속 유지시키는 것은 유도전동기를 정지시킨 후 다시 재가속하는 것보다 계통의 안정도 관점에서 더 큰 이익이 될 수 있다. 즉, 사고가 발생하는동안 속도조절장치나 전자접촉기와 같은 장비들이 탈락 되는 것을 피할 수가 있고, 결국 유도전동기 재가속시 기동전류 발생을 줄일 수 있으므로 계통의 충격 또한 감소한다. 하지만 준-기동현상이 발생할 것이고, 일반적인 모터 초기기동시 발생하는 문제(순간전압강하)보다는 덜 심각하거나 비슷하다.[3]

3. 3상 유도전동기 실험

3.1 실험 장비

본 실험에서 4극, 1/3HP, 60Hz, 220V의 소형 농형유도

전동기가 사용되었다. 또한 다이나모메터를 유도전동기의 축에 연결하여 부하로서 작용하게 하였다. 순간전압강하 및 순간정전의 인가는 6[kW]의 3상 전원시뮬레이터를 사용하였다. 이밖에 각종 파라미터를 측정하기 위하여 4채널 디지털 오실로스코프, 타코메터, 토크메터가 사용되었다.

3.2 실험 구성

실험의 전체적인 결선도는 그림 1과 같다. 3상 전원시뮬레이터를 이용하여 사고파형을 유도전동기에 인가하였고, 유도전동기와 다이나모메터를 연결하였다. 오실로스코프의 채널 3개는 전압 및 전류 파형을 측정하고, 나머지 하나의 채널은 다이나모메터의 유기기전력을 측정하였다.

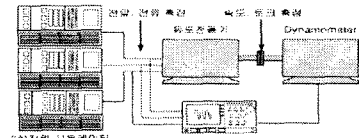


그림 1. 실험 결선도

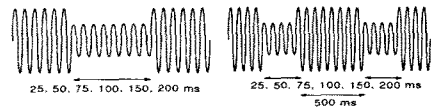
다이나모메터에 직류전압을 인가하면 유기기전력이 나타나고 식 1과 같이 이것은 곧 전동기의 속도의 함수임을 알 수가 있다.

$$e = Blv \quad (1)$$

여기서, e 는 유기기전력, B 는 자속밀도, l 은 도체길이 v 는 도체의 속도를 나타낸다. 이 유기기전력을 측정하여 이벤트 발생시의 유도전동기의 속도변화를 확인하였다.

3.3 실험 사례 선정

실험은 그림 2와 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
그림 2. 실험에 인가된 순간전압 파형

표 1. 실험 케이스

Case	전압강하 횟수	부하상태	전압강하 [%]	전압강하 지속시간 [ms]
Case1	1회	무부하	0, 10, 20, ..., 90	25, 50, 75, 100, 150, 200
Case2				
Case3				
Case4				
Case5				
Case6				
Case7				
Case8	2회	85%		
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. 표1

은 본 논문의 실험케이스를 나타낸다.

이벤트 발생점(point-on-wave)은 R상 전압이 제로로
로싱이 되는 점을 기준으로하여 모든 케이스의 이벤트를
동일하게 설정하였다. 예를 들어, 하나의 상만 전압강하
시 R상만, 두개의 상이 전압강하되는 경우는 R, S상만으
로 국한하였고, R·S·T상 전압강하의 경우에도 그림 3의
이벤트 발생 지점으로 한정하였다. 그림 3은 오실로스코
프로 측정된 실제 파형이다.

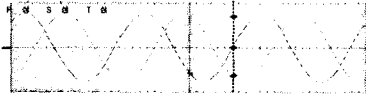
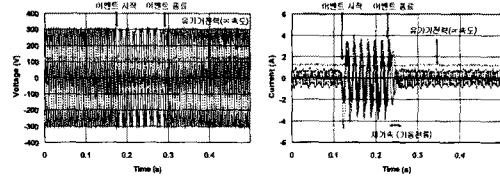


그림 3. 전압파형의 이벤트 발생 지점 (점선)

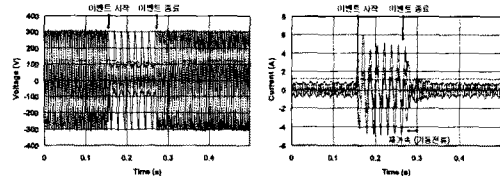
3.4 실험 결과

3.4.1 무부하시 단독 이벤트

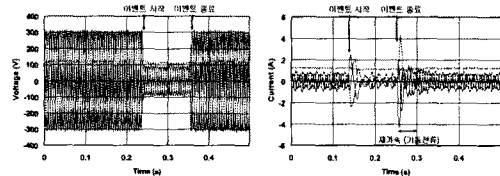
그림 4는 30%의 크기와 100[ms] 지속시간을 가지는
순간전압강하가 R상, R·S상, R·S·T상에 각각 발생했을
경우의 전압 및 전류 파형과 다이노미터의 유효기전력
보여준다. 무부하시 정격전류는 약 0.5[A]이다. 순간전압
강하가 인가되면 전동기는 순간적인 과도현상이 일어나
높은 전류가 흐름을 알수가 있다. 전압이 회복되는 순간
전동기는 재가속하게 되고 기동전류가 다시 흐르게된다.
그림 4 (b)에서 전압강하가 발생한 R상과 S상의 전류는
이벤트 기간중 4~5배정도 증가하고, 전압강하가 발생하
지 않은 T상은 9~10배 정도로 매우 크게 증가한다. 크
게 증가한 전류에 의해서 모터는 더욱 큰 전력을 필요로
하게 된다.



(a) R상 30% 전압강하, 지속시간100[ms], 무부하

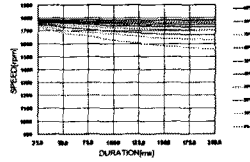


(b) R·S상 30% 전압강하, 지속시간100[ms], 무부하

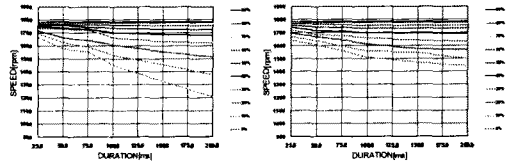


(c) R·S·T상 30%로 전압강하, 지속시간 100[ms], 무부하
그림 4. 무부하시 단독 순간전압강하 인가의 경우
측정된 파형(왼쪽 : 전압, 오른쪽 : 전류)

그림 5는 각 케이스의 지속시간과 전압강하의 크기에
따른 최대 전동기 감소 속도를 나타낸다. 이벤트 지속시
간이 길수록, 전압강하가 클수록 속도는 더욱 떨어진다.
R상이 전압강하된 경우보다 R·S상이 강하되거나, R·S·
T상이 모두 전압강하된 경우에 더 큰폭으로 감소하였다.



(a) R상 순간전압강하시

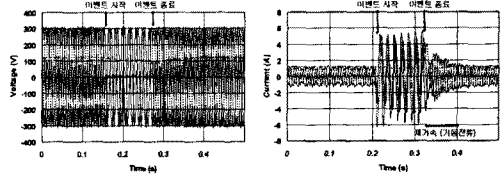


(b) R·S상 순간전압강하시 (c) R·S·T상 순간전압강하시
그림 5. 무부하시 단독 순간전압강하 인가의 경우
측정된 최대 감소 속도

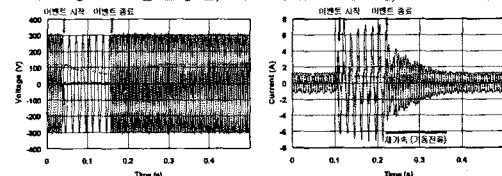
3.4.2 85%부하시 단독 이벤트

그림 6은 85% 부하시 순간정전인 100[ms]동안 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 기동전류
의 지속시간은 더 길어졌을 알수가 있다. 그림 6 (a),
(b), (c)의 경우를 살펴보면 부하가 걸렸을 경우가 무부
하 운전시보다 사고가 발생하면 전동기의 관성에 의해
더욱 심하게 속도와 토크가 떨어지는 것을 알수가 있다.

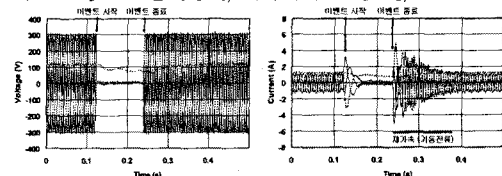
그림 6 (b)의 경우를 살펴보면 이벤트 발생시 정격 모
터속도(1780[rpm])의 반이상으로 떨어지며, 토크도 또한
심하게 감소한다. 재가속시 기동전류는 더욱 커지고 무
부하의 경우에 비해 긴시간 지속된다. 따라서 모터가 회
복하는데 더 큰 전력을 필요로하게 된다. 그림 6 (c)의
경우도 마찬가지로 모터속도가 반정도로 떨어짐을 확인
할수 있다.



a) R상 0% 순간정전, 지속시간 100[ms], 85% 부하



b) R·S상 0% 순간정전, 지속시간 100[ms], 85% 부하



c) R·S·T상 0% 순간정전, 지속시간 100[ms], 85%부하
그림 6. 85% 부하시 단독 순간정전인가의 경우
측정된 파형(왼쪽 : 전압, 오른쪽 : 전류)

그림 7은 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.

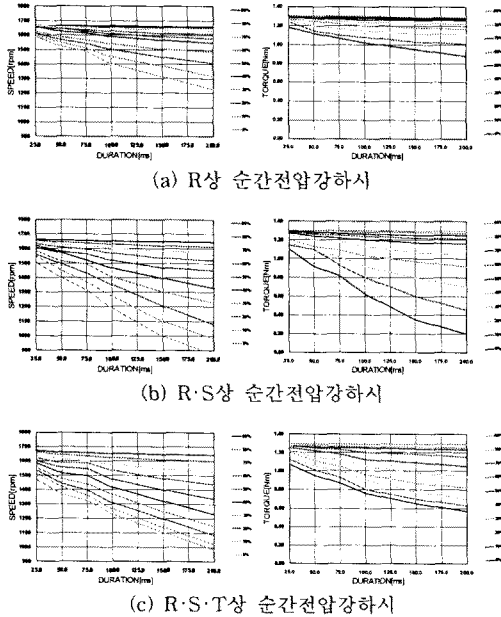


그림 7. 85% 부하시 단독 순간전압강하의 경우 측정된 전동기 속도 및 토크 (왼쪽 : 속도, 오른쪽 : 토크)

3.4.3 85%부하시 연속 이벤트

그림 8은 70%의 단독 순간전압강하와 연속순간전압강하를 비교하고 있다. 그림 8 (b)는 한번의 전압강하 발생 후 0.5초후에 다시 전압강하가 발생한 경우를 보여준다. 여기서 0.5초는 우리나라 배전계통 보호협조시 리클로저의 최소 리클로징 시간을 의미한다. 실험결과, 첫 번째 전압강하후 두 번째 전압강하가 발생할때 토크는 더욱 떨어지는 것으로 나타났다. 그림 9에서 (a)는 첫 번째 순간전압강하 발생시 최대 감소 토크를 (b)는 0.5[s]후 재차 순간전압강하가 발생했을때 최대 감소 토크를 나타낸다.

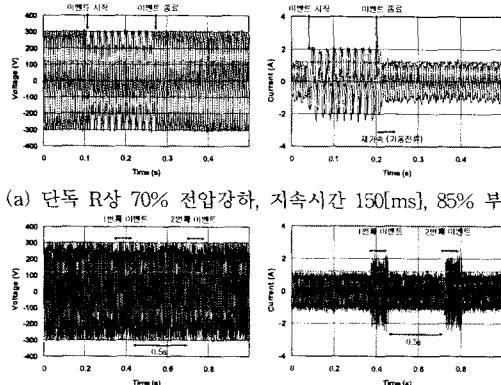


그림 8. 단독 순간전압강하와 연속 순간전압강하의 비교

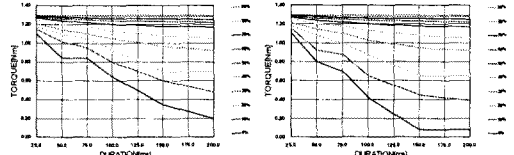


그림 9. 연속 R·S상 전압강하 발생시 최대 감소 토크

3.4.4 실험결과와 분석 및 보완사항

본 실험에 사용된 전원시뮬레이터의 용량6[kW]이고, 유도전동기의 용량은 1/3마력의 소용량 전동기로서 전원 용량이 부하용량에 비해 매우 크기때문에 순간전압강하 발생이후 정상회복시 전동기 재가속에 따르는 과도현상이 크게 나타나지 않았다. 따라서 준-기동현상 또한 심하게 나타나지 않았다. 전원용량과 부하용량을 적절하게 선정할 필요가 있다. 실제 배전계통에 대용량 유도전동기는 수없이 많이 연결되어 있을것이고 따라서 공급측에서 전동기 기동시 충분한 전력을 공급하기 힘들것이다. 계통의 유도전동기에 순간전압강하가 발생하면 과도현상 및 기동전류는 오래 지속될 것이고 속도 및 토크는 심하게 떨어질 것이다. 따라서 한번의 순간전압강하후 전동기가 정격속도로 회복되기 전에 다시 전압강하가 발생한다면 전동기 및 연결부하는 심각한 영향을 받을 것이다.

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 고려했다. 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 기초전력공학 공동연구소(02-중-03) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] 김재철 외, "순간전압강하에 의한 수용가측 영향의 현황 분석", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 12 권 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, "Behavior of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions", IEEE Trans. on Powr Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002.
- [5] IEEE Std. 1250-1995, IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances