

유도전동기 부하를 고려한 배전계통의 전압저하(sag)특성

(The Characteristic of Voltage Sags in Distribution System with Induction Motor Loads)

오용택·김진성*

(Yong-Taek Oh · Jin-Sung Kim)

Abstract

The calculation of depth and duration of a sag is in both methods based on two simple assumptions. One is that due to the short circuit, the voltage drops to a low value immediately magnitude. Another is that when the fault is cleared, the voltage recovers immediately. These assumptions, however, do not hold in the case of a substantial part of the load consisting of electrical motors like in many industrial power systems. During the short circuit, the motors will slow down. Their reacceleration after the fault will increase the load current and thus prolong the voltage sag. This paper will discuss some of the aspects of the influence of induction motors on voltage sags

1. 서론

전압저하는 그림 1.1처럼 부하에 공급되는 전압의 크기가 어느 시간동안 일시적으로 감소하는 현상으로 주로 계통상의 단락회로 사고에 의해 발생하며 대용량 모터의 기동, 부하의 갑작스런 증가 그리고 콘덴서 뱅크의 투입 같은 스위칭 작용에 의해서도 발생한다.

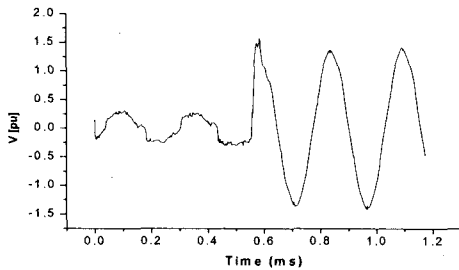


그림 1.1 단락회로 고장에 의한 전압저하

그러한 단락회로 고장에 의한 짧은 기간의 전압저하는 아주 중요한 전력품질문제로 인식되고 있다. 특히, 컴퓨터와 같은 전력전자 장비들이나 속도 조절 장치 그리고 공정제어 시스템들은 그런 전압외란에 상당히 민감하다. 그러나 이러한 인식에도 불구하고 외란에 민감한 그런 장치들의 전압저하 형태에 대한 분석이나 연구가 그리 많이 이루어지고 있지는 않는 실정이다. 보통 전압저하의 특성 즉,

감소된 전압크기와 외란 지속시간은 다음과 같은 두 개의 간단한 가정을 근거로 계산된다. 하나는 단락회로 고장에 의한 전압은 즉시 어떤 낮은 값으로 떨어진다는 것이고, 둘째는 고장이 제거된 후 전압은 즉시 복구가 된다는 가정이다. 이러한 가정들은 그림 1.2에서처럼 대부분의 전압저하 현상 해석 결과를 통해서 적절한 가정임을 알 수가 있다.

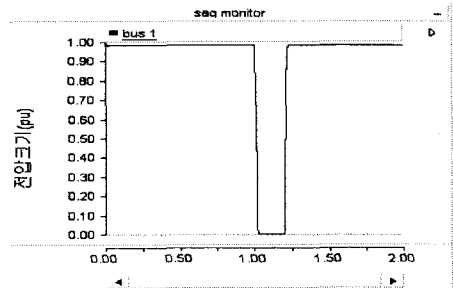


그림 1.2 계통분석을 통한 전압 감소현상

그러나 많은 산업용 배전계통에서 전기적인 전동기들이 주요한 성분으로 부하를 이루고 있는 영역의 경우에는 그런 가정들은 유효하지가 않다. 왜냐하면 단락회로 고장 동안 전동기들은 서서히 감속할 것이고 고장 후에도 재가속하는 전동기의 동작특성이 부하전류를 증가시키고 그 결과 전압이 감소하는 현상을 다시 연장시키게 된다. 즉, 대형 유도전동기가 고장 고장발생시 감속을 하는 동안 전동기는 발전기처럼 동작을 하여 모선의 전압이 바로 감소하는 것이 아니라 서서히 감소하는 형태

를 갖게 되고 고장 후에 다시 전동기가 가속을 하게 되면 상당한 기동전류가 필요하기 때문에 부하 전류가 급격히 상승하게 된다. 이것은 고장이 제거된 후에도 발생하는 또 다른 외란현상으로서 전압저하 현상의 또 다른 형태를 취하게 되는 것이다.

지금까지 전동기 동작에 의한 전압저하 현상이나 전동기 기동 특성에 의한 전압저하 현상에 대한 연구는 적지않이 진행되어 왔으나 단락회로 고장에 의한 전압저하 현상에서 전동기의 특성을 고려한 경우는 그리 많지 않았으며 또한 다양한 형태의 단락회로 고장을 적용한 연구도 그리 많지 않았다.[1][2] 따라서 이 논문에서는 대형 유도 전동기가 주요한 부하를 이루고 있는 배전계통에서 다양한 단락회로 고장이 발생했을 때 전압저하의 특성을 분석하고자 한다. 분석방법은 PSCAD/EMTDC 가상 시뮬레이션 해석소프트웨어를 이용하였으며 실제 배전계통상에 존재하는 대용량 유도전동기 부하를 두 개의 설비모선에 적용하였다. 배전계통상에 다양한 단락회로 고장이 발생하였을 때 대형 전동기가 발생한 전압저하에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았으며 이런 전동기의 영향을 보다 더 확실히 이해하기 위하여 전동기 부하가 있을 때와 없을 때를 각각 달리 적용하는 방식으로 비교분석하였다. 또한 적용시킨 전동기의 주요한 특성요인으로는 고장 발생시 전동기가 서서히 감속하는 과정에서의 발전기 역할과 고장 후 재가속하는 과정에서 발생하는 또 다른 과부하전류에 의한 새로운 전압저하 현상에 중점을 두었다.

2. 일반부하를 가진 배전계통의 전압저하 특성

그림 21은 배전계통에 일반 저항성 부하가 연결된 계통도를 보여준다.

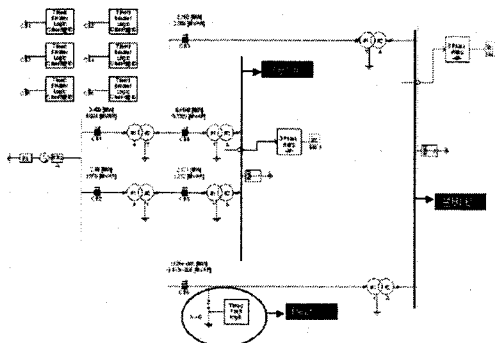


그림 2.1 저항성 부하가 연결된 배전계통

설비 A와 B에 동일한 부하가 있으며 설비 B와 연결된 피더(feeder)상에 단선지락사고가 0.2초에서 발생하여 0.2동안 지속 되었을 경우 설비 A와 B 모선의 전압상태는 그림 2.2와 같이 나타난다.

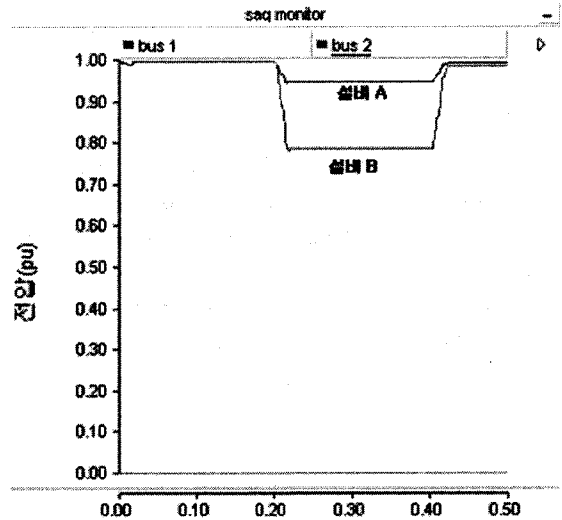


그림 2.2 단선지락 사고 시 전압저하 현상

고장이 발생하면 설비 A의 모선전압은 약 0.95[pu]로 즉시 감소하고 설비 B의 모선전압은 약 0.78[pu]로 즉시 감소한다. 또한 고장 후에 설비 A, B의 모선전압은 어떤 지연 없이 바로 고장 전의 값으로 복구함을 알 수 있다. 이것은 대형 유도전동기 부하같이 모선전압에 대하여 반작용을 줄 수 있는 성분이 계통상에 존재하지 않기 때문이다. 또한 위 그림에서 고장 동안 설비 A와 B의 전압크기가 다른 이유는 선로임피던스나 변압기 임피던스차이에 의한 결과이며 고장 후에 설비 B의 모선전압이 설비 A의 값보다 작은 이유는 설비 B는 하나의 변압기에 의해 전력을 공급받는 한편 설비 A는 두 개의 변압기로부터 전력을 공급받기 때문이다.

3. 대형 유도전동기 부하를 가진 배전계통의 전압저하 특성

3.1. 고장 후(post-fault)의 전압저하 특성

대형 유도전동기 근처에서 고장이 발생하면 모터 단자의 전압은 감소할 것이며 이로 인해 전동기에 의해 생성된 기계적인 토크가 감소하게 된다. 반면 부하 토크는 여전히 같은 상태로 유지되기 때문에 전동기의 속도는 결국 느려지게 된다. 고장이 제거된 후에 전압이 다시 복구되면 전동기는 공극에 있는 자기력 선속(magnetic flux)을 다시 생성하고 재가속(re-acceleration)하기 위하여 낮은 역률의 고전류를 생

산한다. 따라서 대형 유도전동기가 있는 계통에서 이러한 돌입전류는 수 초 동안에 걸쳐 전압 감소를 일으킬 수가 있는데 바로 이것이 고장 후에 발생할 수 있는 전압저하의 또 다른 특성이라 할 수 있다.

그러한 고장 후의 전압저하는 특히, 병렬 운전상태를 통해 보상공급을 하는 계통에서는 심각해 질 수 있다. 왜냐하면 보호 장비가 고장난 피더를 차단하여 그 결과 전체 전력공급을 약하게 할 수 있기 때문이다. 그런 상태에서 전동기에 영향을 준 돌입전류가 이런 더 취약해진 계통으로 유입될 수 있기 때문이다.

3.2. 모의실험 계통 구성도 및 실험 데이터

일반 저항성 부하대신 대형 유도전동기가 주 부하를 이루고 있는 계통은 그림 2.1의 계통과 같은 구성 환경을 가지고 있으며 설비 A와 B에 각각 3개씩의 동일한 대형 유도전동기로 부하를 고려한 것만 차이가 있다. 모의실험 계통 구성도는 그림 3.1과 같고 그림 3.2는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 EMTDC/PSCAD 프로그램의 배전계통 모델 도면이다.

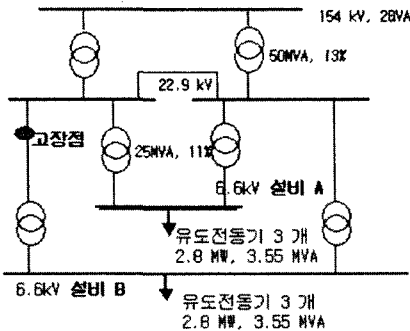


그림 3.1 모의실험 계통 구성도

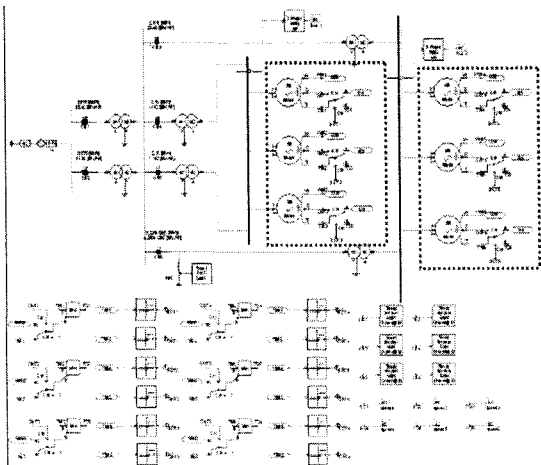


그림 3.2 EMTDC/PSCAD Schematic 도면

적용된 주요한 계통의 데이터는 다음과 같다.

- 1) 154 kV, 60Hz, 2000MVA 메인 버스
- 2) 각각 5 MVA, 10km의 선로(0.224 Ω /km, 1.13 mH/km, 10.3 nF/km)
- 3) 50MVA, 13%, 154/22.9kV 변압기 2대
- 4) 25MVA, 11%, 22.9/6.6kV 변압기 4대
- 5) 고장시간 : 1s에서 발생하여 200ms동안 지속
- 6) 고장위치 : 22.9kV 버스에서 1km 떨어진 거리
- 7) 고장유형 : 1선 지락, 3상 단락
- 8) 고장 임피던스 : 0.01 Ω
- 9) 차단기 투입(Close) 임피던스 : 0.1 Ω

또한 부하로 적용된 전동기 특성은 다음과 같다.

- 1) 2.8 MW, 3.55 MVA 6대, 3상 농형 유도전동기
- 2) 자화 리액턴스 : 5.8 pu
- 3) 고정자 저항 : 0.007 pu
- 4) 고정자 리액턴스 : 0.2 pu
- 5) 내부 농형 회전자 저항 : 0.01 pu
- 6) 내부 농형 회전자 리액턴스 : 0.097 pu
- 7) 외부 농형 회전자 저항 : 0.06 pu
- 8) 외부 농형 회전자 리액턴스 : 0.033 pu

3.3. 모의실험 결과

모의실험은 가장 흔히 발생하는 1선 지락사고와 가장 큰 악영향을 주는 3상단락사고를 고려하였으며 고장 발생동안 전압이 어떤 값으로 즉시 감소하지 않고 일시적인 전동기의 발전기 동작에 의해 서서히 감소하며 고장 후에도 전압이 즉시 복구되는 것이 아니라 전동기의 재가속 특성에 의해 서서히 복구되는 현상을 검증하는 것이 이 모의실험의 목표라 할 수 있다.

그림 3.3은 3상단락사고가 발생했을 때의 설비 A와 B의 모션전압 변화를 나타낸다. 고장 이전에는 두 모선에 연결된 전동기의 기동전류에 의해 초기에 전압이 감소하다가 약 0.96[pu]의 값으로 유지되고 있다. 고장이 발생하면 설비 A는 약 0.57[pu]의 전압 값으로 감소하고 설비 B는 거의 0[pu]값으로 하락함을 알 수 있다. 여기서 특히 주목할 점은 전압이 각각의 최소 값으로 감소할 때 즉시 감소하는 것이 아니라 서서히 감소한다는 것이다. 이것은 전동기의 공급전압이 감소하면서 전동기가 일시적으로 발전기 모드로 동작을 하여 모선에 전압을 공급한다는 전동기 특성에 기인한다.

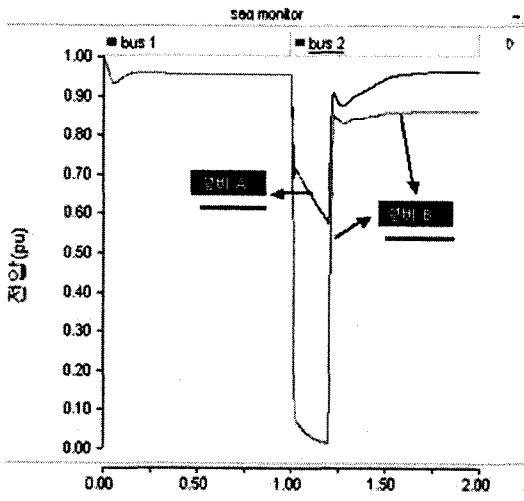


그림 3.3 3상단락사고시 설비 A, B의 모션전압

또한 설비 B의 모션전압은 차단기 차단에 의해 설비 A보다 훨씬 적은 전압 값을 갖게 된다. 고장 후의 전압 형태를 보면 마찬가지로 즉시 원래의 전압 값으로 복구하는 것이 아니라 서서히 증가한다는 것이다. 특히, 고장 후에 전동기가 재가속을 함으로서 기동전류에 의한 약 0.2[pu]의 전압감소를 다시금 일으킨다는 사실이다. 재가속 후 설비 A는 원래의 전압 값으로 복구가 되지만 설비 B의 모션전압은 약 0.82[pu]의 전압으로 유지되어 새로운 전압저하 현상을 일으키고 있음을 알 수 있다. 이로 인해 설비 B는 고장 후에도 새로운 전압외란 현상을 경험해야하는 문제점에 부딪치게 된다. 이것은 그림 3.4에서 보이는 것처럼 전동기의 속도변화에서 쉽게 분별할 수 있다.

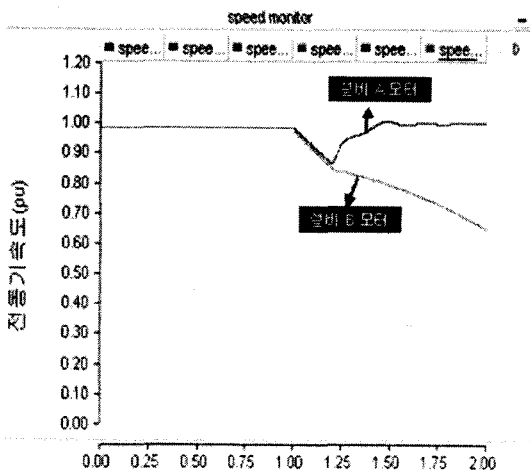


그림 3.4 3상단락사고시 설비 A, B의 전동기 속도

즉, 고장이 발생하면 설비 A와 B의 전동기들은 속도가 같이 감소하지만 고장 후에는 설비 A의 전동기들이 원래의 동기속도를 유지하는 반면 설비 B의 전동기들은 동기속도를 유지하지 못하고 계속 감소하여 결국은 모션의 전압을 감소시키게 된다.

그림 3.5는 1선지락사고가 발생했을 때의 설비 A와 B의 모션전압 변화를 나타낸다. 3상단락사고시와 마찬가지로 고장 이전에는 두 모선에 연결된 전동기의 기동전류에 의해 초기에 전압이 감소하다가 약 0.96[pu]의 값으로 유지되고 있다. 고장이 발생하면 설비 A는 약 0.57[pu]의 전압 값으로 감소하고 설비 B는 약 0.18[pu] 값으로 하락함을 알 수 있다. 마찬가지로 전동기의 발전기 동작에 의해 전압이 서서히 최소 값으로 감소한다. 고장 후의 전압은 3상단락시와 비슷한 형태를 보이며 이 경우에도 설비 B의 전압은 복구되지 않고 새로운 전압 감소 현상을 일으키고 있음을 알 수 있다.

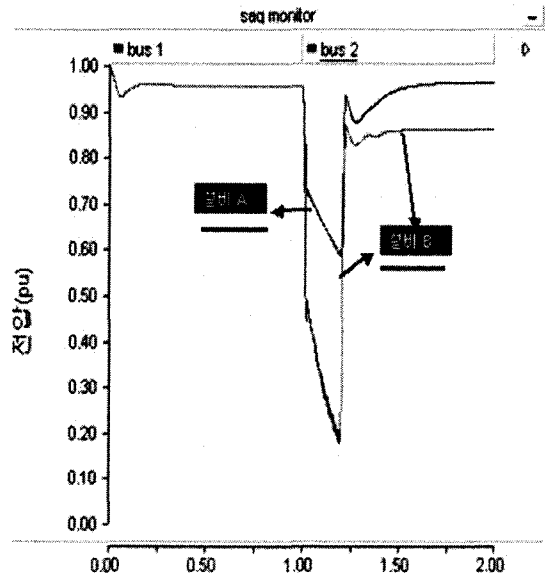


그림 3.5 1선지락 사고시 설비 A, B의 모션전압

또한 고장후의 설비 B 전동기의 속도는 3상단락 사고시에 비해서 큰 값을 가지고 있지만 결국 동기속도를 유지하지 못하고 점차 속도가 감소하고 있음을 알 수 있으며 이는 인해 모션의 전압을 감소시키게 된다.

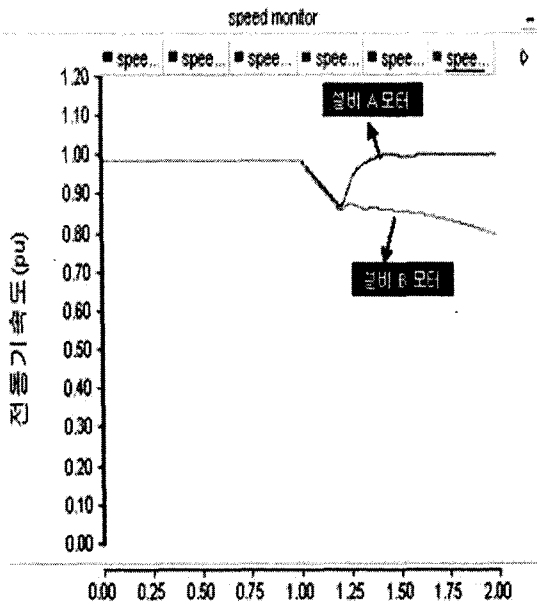


그림 3.6 1선지락 사고시 설비 A, B의 전동기 속도

4. 결론 및 고찰

이상에서 대용량 전동기가 부하로 연결된 계통에서 고장이 발생한 후에도 심각한 차후의 전압저하가 발생함을 살펴보았다. 그러한 문제점을 해결하기 위한 방법은 다양하게 거론될 수 있을 것이다. 즉, 심각한 고장 후의 전압저하와 전동기의 동기속도 감소를 극복하기 위하여 계통의 용량이 더욱 강화되거나 재가속되는 전동기의 수를 줄여야 하는 방법들이 될 것이다. 그러나 첫 번째 방법은 효능은 뛰어나지만 너무나 많은 추가적인 경제적 비용이 요구된다는 단점이 있다. 두 번째 방법이 그나마 경제적인 해결책이 될 수 있을 것이다. 가령, 꼭 필요한 전동기가 멈추기 전에 부족 전압 릴레이 같은 보조 장비를 이용하여 초기에 꼭 필요치 않은 전동기를 트립시키는 것이다. 이 트립된 전동기는 후에 계통이 완전히 안정화된 후 자동으로 수동이든 계통에 다시 투입될 수 있기 때문이다.

이러한 다양한 해결책들은 본 논문이 지금까지의 분석과 결과를 토대로 앞으로 배전계통에서 전압저하에 대한 새로운 현상을 발견하고 계속 분석해야 할 향후의 연구과제로 남겨 두기로 한다.

참고 문헌

[1] M. Z. EL-Sadez, "Voltage instabilities subsequent to short circuit recoveries", Electric Power Syst. Res., Vol. 21, 1991, pp.9-16

[2] T. C. Das, "The effect of momentary Voltage dips on the operation of induction and synchronous", IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 26, 1990, pp.711-718.

[3] Van E. Wagner, Allen A. Andreshak, Joseph P. Staniak, "Power Quality and Factory Automation", IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 26, No. 4, July/August 1990.

[4] Christopher J. Melhom, Timothy D. Davis, George E. Bear, "Voltage Sags : Their Impact on the Utility and Industrial Customers", IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 34, No. 3, May/June 1998.

[5] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", 1996.

[6] Lj. Kojovic and S. Hassler, "Application of current limiting fuses in industrial system for improved power quality and protection", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997, pp. 791-800.

[7] Fabio Tosato and Stefano Quaia, "Reducing Voltage Sags Through Fault Current Limitation", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 12-17

[8] G. G. Karady, "Concept of a combined short circuit limiter and series compensator", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 1031-1037

[9] Fabio Tosato and Stefano Quaia, "Reducing Voltage Sags Through Fault Current Limitation", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 12-17

[10] Ma가 McGranaghan, Bill Roettger, "Economic Evaluation of Power Quality", IEEE Power Engineering Review, February 2002, pp. 8-12

저자 소개

오용택 (吳龍澤)

1958년 6월 17일생.
1980년 숭실대 전기공학과 졸업.
1982년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
1987-1991년 한전 정보처리처 과장.
1991년- 현 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기공학전공 교수.

김진성 (金鎭成)

1968년 8월 10일생, 1999년 한국기술교육대학교 전기공학부 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년~현재 한국기술교육대학교 능력개발교육원 전기전자분야 기술연구원.