

배전계통 단선지락사고에 의한 전압저하 저감방법에 관한 연구

(The Study on Reducing Voltage Sags Due to Single Line Short Circuit Faults in Distribution System)

오용택 · 김진성*

(Yong-Taek Oh · Jin-Sung Kim)

Abstract

Recently, power-electronics equipments or machine that microprocessor is included and computers have been installed continuously in industrial process or region of electronics customer. So concern for power quality, especially sags has been increased. Because those equipments are very sensitive to sags. The sag is phenomenon that magnitude of load voltage temporarily decreases because of power system fault. If a certain equipment in industrial process have any trouble result from sag, it can cause utility to be charged for enormous economics loss. Therefore it need to analyze the characteristic of sag and then mitigation method for sags in distribution system in order to increase reliability. This paper gives an overview of sags characteristic due to short circuit fault in distribution system and after a general discussion of the various forms mitigation, gives a sags mitigation method with concentrating on mitigation-device interface method, especially FCL that is Fault Current Limiter.

1. 서 론

최근 들어서 컴퓨터 등 마이크로프로세서가 장착된 전력전자장비나 기기들이 산업공정이나 일반 가정에 계속적으로 설치가 되고 있는 환경에서 전압저하는 상당히 중요한 전력품질의 한 요소로 대두되고 있다. [1] [2]

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.

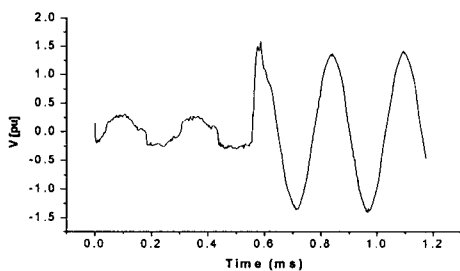


그림 1.1 단락회로 고장에 의한 전압저하

전압저하의 두 가지 주요한 특성으로는 크기와 지속시간을 들 수 있는데 크기는 고장에 의해 발생하는 실효 전압 값이고 지속시간은 전압이 낮아지는 시간이다. IEEE Standard Coordinating Committee 22에 의하면 크기가 공칭전압의 0.1~0.9[pu]이고 지속시간이 8.0[ms]~1[min]일 경우를 전압저하 현상이라 정의하고 있다. [5]

문제는 전압저하가 PLC, CNC, 컴퓨터, 기동기 등 설비에 설치된 전압외란에 민감한 장비들에게 영향을 주었을 경우 산업설비 또는 다른 특정한 장비를 오동작 시키는 등 전체 설비 시스템의 동작 신뢰도를 감소시켜 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다는 것이다. [3] [4]

따라서 최근 들어 배전계통상에서 전압저하의 특성을 분석하고 그에 따른 전압저하를 저감시키는 방법이 계통의 신뢰도를 높이는데 중요한 문제로 다루어지기 시작했다. [6] [7] [10]

전압저하를 완화시킨다는 것은 결국 전압저하 특성인 전압크기와 지속시간을 조절하여 부하설비나 장비가 오동작을 일으키지 않도록 안정된 전압을 공급해 준다는 것이다.

전압저하를 완화시키는 방법으로는 여러가지 형태가 있지만 본 연구에서는 충격 완화장비를 투입하여 전압저하를 저감시키는 방법에 초점을 두었

으며 특히 L-C 직렬회로를 이용한 고장전류제한기를 특성화하여 배전계통에서의 적용 가능성을 모의실험을 통해 검증하였다. 고장전류제한기가 투입된 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 전압저하 완화성능을 해석하였고 비교방법은 가장 흔하게 발생하고 있는 단선지락사고를 적용한 후의 전압의 크기를 가지고 분석하였다.

2. 충격완화장비 인터페이스

장비 인터페이스에 의한 방법은 그림 2.1에서처럼 민감한 부하를 보호하기 위하여 전압의란에 대처하기 위한 여러 가지 충격완화장비를 설치하는 것이다.

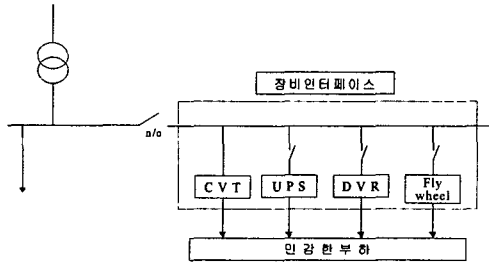


그림 2.1 장비인터페이스된 계통

CVT(Constant Voltage Transformer)는 설치가 용이하고 응답속도가 빠르지만 대용량의 계통을 보호하기에는 비용이 많이 추가되며 특히 출력전압이 고정되기 때문에 큰 유입전류가 흐를 경우 전압왜형이 발생하여 효율이 크게 떨어지는 단점 때문에 근래에는 UPS(Uninterrupted Power Supply)에 의해 대체되고 있다. UPS는 정전 시에도 부하를 보호할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이지만 축전지 사용에 의한 유지보수가 어렵고 대용량 보호 시 축전지 비용이 상당히 증가하게 되는 경제적인 문제점을 안고 있다. 따라서 UPS는 저전력 부하설비보호에 적합한 장치이며 큰 용량의 부하를 좀 더 적은 비용으로 보호하기 위한 방법이 필요하게 되었는데 그 중 하나가 DVR(Dynamic Voltage Restorer)이다.

DVR은 대용량의 부하에 대해서 전압저하에 대처하는 성능이 우수하지만 변압기, 컨버터, 부하와의 직렬연결 그리고 각종 보조장치들에 의한 손실이 많이 발생하여 전체적으로 효율이 떨어지는 단점이 있다. 또한 플라이휠과 같은 에너지 저장장치들은 정전 시에도 안정적으로 부하를 보호할 수 있지만 제어를 위한 부가적인 장치들과 공간이 발생하여 유지보수 비용과 전력손실이 증가한다는

단점이 있다.

이 논문에서 다루고자하는 고장전류제한기는 그러한 단점들을 대부분 해소시켜준다. 다음 장에서 보이는 것처럼 회로가 L-C 직렬공진을 이용하기 때문에 구조가 아주 간결하여 설치가 용이하고 응답속도가 빠르다는 것이다. 또한 커패시터에 병렬 형태의 충격흡수장치(Surge Arrestor)를 연결함으로써 다른 제어시스템이나 전력전자장치를 사용하는 문제점이 발생하지 않는다는 것이다. 즉, 유지보수가 간결하여 다른 장비에 비해 비용이 많이 소요되지 않으며 대용량 부하의 전압저하도 효과적으로 대처함을 사례연구를 통해서 확인할 수 있었다.

이러한 고장전류제한 방법은 대략 15년 전부터 대두되기 시작하여 다양한 형태의 FCL(Fault Current Limiter)응용 회로들이 최근 들어 많이 소개되고 있다.[30]

여기에서는 기존에 연구되었던 방법 중에서[24] MOV(Metal Oxide Varistor)대신 Surge Arrestor를 사용하여 커패시터 보호 장치의 선택의 폭을 넓혔으며 3상 단락인 평형사고에 국한했던 고장을 불평형사고에 의한 고장으로 확대해석하였다. 또한 FCL를 구성하는 L, C 그리고 Surge Arrestor의 변수 값들을 다양하게 적용하여 그 결과를 검토하였다.

3. FCL회로 특성과 전압보상 원리

제안된 FCL(Fault Current Limiter)의 기본원리는 그림 3.1과 같다. 계통주파수에 동작되는 L-C 직렬공진회로에 큰 용량의 에너지를 흡수할 수 있도록 설계된 Surge Arrestor가 커패시터와 병렬로 연결되어 커패시터를 보호할 수 있다.

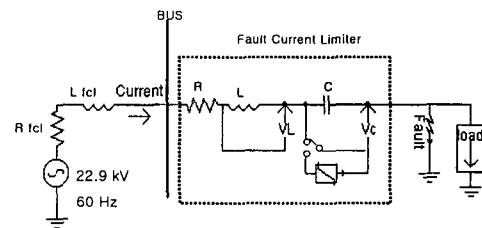


그림 3.1 FCL의 기본 구성도

3.1. FCL회로의 특성

그림 3.1의 부하단에서 단락사고가 발생했을 때 FCL 직렬 L-C회로에 의한 단락전류를 수학적으로 계산할 수 있다. 전원단자에서 바라본 계통 등

가임피던스와 FCL의 저항을 0이라 가정한다. 또한 전원전압을, $v(t) = V_p \sin(\omega t + \gamma)$ 라 하고,
 $y''(t) = i(t)$, $\omega^2 = 1/LC$ 이면 그림 3.1의 모델식은 다음과 같다.

$$y''(t) + \omega^2 y(t) = \frac{V_p}{L} \sin(\omega t + \gamma) \quad (3.1)$$

위 식의 미분방정식 해는 다음과 같다.

$$y(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + C_3 \cos(\omega t + \gamma) \quad (3.2)$$

또한 선로 임피던스와 부하 임피던스의 합을 $Z \angle \phi$ 라 하면 정수 값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{V_p}{\omega Z} \cos(\gamma - \phi) \\ C_2 &= \frac{V_p}{\omega Z} \sin(\gamma - \phi) + \frac{V_p}{2\omega^2 L} \cos \gamma \\ C_3 &= -\frac{V_p}{2\omega L} \end{aligned} \quad (3.3)$$

이제 식 (3.2)을 전류의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$i(t) = V_p \left[\frac{1}{Z} \sin(\omega t + \gamma - \phi) + \frac{1}{2\omega L} \sin \gamma \sin \omega t + \frac{1}{2\omega L} \omega t \sin(\omega t + \gamma) \right] \quad (3.4)$$

또한 인덕터와 커패시터 양단의 전압은 공진조건을 고려하면 다음과 같다.

$$v_L = i(t) * X_L = -i(t) * X_C \quad (3.5)$$

3.2. FCL의 전압보상 원리

FCL이 없는 경우 선로에 단락사고가 발생하면 그림 3.2에서처럼 고장선로전류는 고장초기부터 첨두값을 가지고 증가를 하며 그에 따라 버스의 전압도 감소하게 된다.

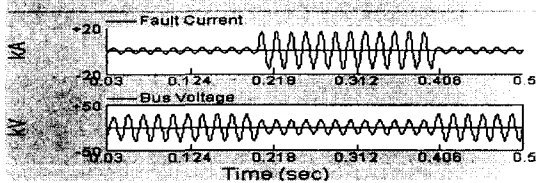


그림 3.2 FCL이 없는 경우의 고장선로전류와 버스전압

그러나 FCL이 인터페이스 되면 식 (3.4)에 의해 표현되는 L-C 특성에 의해서 고장전류는 그림 3.3의 (a)에서처럼 고장 초기부터 첨두값을 가지지 않고 점차적으로 증가하여 첨두값에 도달하는 형태를 지니게 되는데 이러한 FCL의 특성이 부하에 유연한 즉, 그리 심각하지 않은 단락회로 과도현상을 결정지으며 배전계통에서 전압저하 현상을 감소시키는데 매우 유용하게 적용될 수 있다. 이것은 그림 3.3의 (b)에서 명확히 알 수 있는데 그림 (a)의 제한된 고장전류에 의해서 버스전압의 감소현

상이 발생하지 않고 따라서 부하에는 전압저하 현상이 거의 발생하지 않게 된다. 또한 식 (3.5)으로 표현된 FCL의 인덕터와 커패시터 양단의 전압도 그림 (c)과 (d)처럼 제한된 고장전류에 의해서 점차적으로 증가한다.

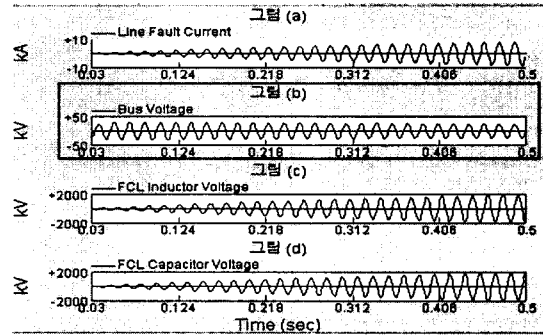


그림 4.3 FCL에 의한 고장전류 형태와 복구된 버스전압 및 인덕터, 커패시터 전압

4. 사례연구

4.1. 모의실험 계통 구성도 및 실험 데이터

사례연구를 위한 모의실험 계통 구성도는 그림 4.1과 같고 그림 4.2는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 EMTDC/PSCAD 프로그램의 배전계통 모델 도면이다.

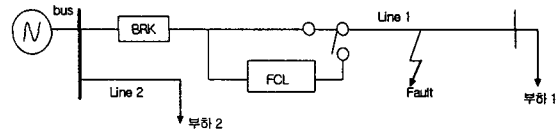


그림 4.1 모의실험 계통 구성도

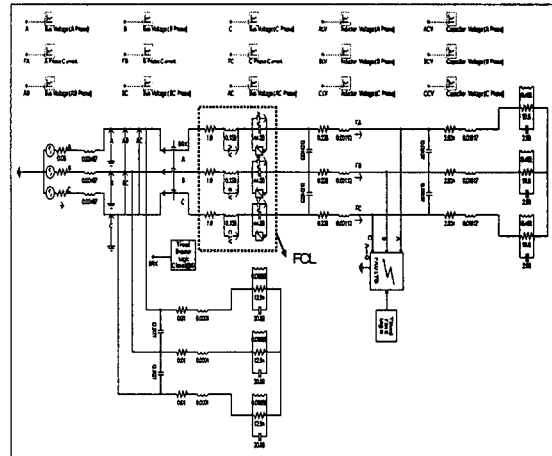


그림 4.2 EMTDC/PSCAD Schematic 도면

또한 적용된 주요한 계통의 데이터는 다음과 같다.

- 1) 22.9 kV, 60Hz, 2400MVA 고장용량의 메인 버스
- 2) 각각 5 MVA, 10km의 선로(0.224 Ω/km, 1.13 mH/km, 10.3 nF/km)
- 3) 4.4 MW와 2.3 MVAR(PF 0.88)의 선로 부하
- 4) FCL(R=1Ω, L=158 mH, C=44.58 uF, Surge Arrestor Protection level=30 kV)
- 5) 고장시간 : 200ms
- 6) 고장위치 : 버스바에서 1 km 떨어진 거리의 선로 1
- 7) 고장유형 : 1선지락사고
- 8) 고장 임피던스 : 0.01 Ω
- 9) 차단기 투입(Close) 임피던스 : 0.1 Ω

4.2. 모의실험 결과

모의실험은 가장 흔히 발생하는 1선 지락사고를 고려하였으며 사고 발생시 FCL이 없는 경우와 있는 경우의 단락 고장 전류와 버스 전압의 형태를 비교하는 것에 초점을 두었다. 즉, 불평형사고가 발생하더라도 FCL이 고장전류를 제한하여 버스의 전압을 안정적으로 유지시켜주는 기능의 검증이 모의실험의 목표라 할 수 있다.

그림 4.3 (a)은 선로 1의 1km지점에서 1선(a상) 지락 사고가 발생했을 때 FCL이 없는 경우의 고장 선로전류를 나타낸다. 고장시간 동안에 건전상인 b와 c상(약 180A)과는 달리 고장인 a상의 전류는 약 8KA의 고장전류가 발생함을 알 수 있다. 그에 따라 상전압 또한 그림 4.3(b)에서처럼 정격전압보다 75%정도로 감소하여 부하 버스에 심각한 전압저하 현상을 일으키고 있음을 짐작할 수 있다. 그림 4.3(c)은 선간전압 파형을 나타내는데 건전상인 b와 c의 선간전압은 정격전압으로 유지되고 있지만 a-b, a-c의 선간전압은 약 35% 정도 감소함을 확인할 수 있다.

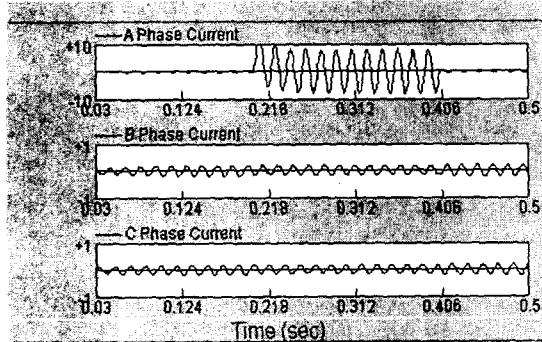


그림 4.3(a) 상 전류(kA)

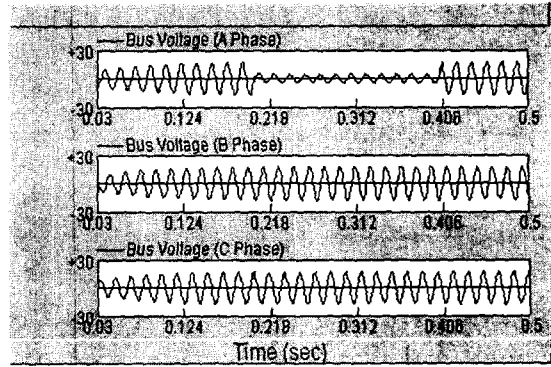


그림 4.3(b) 상 전압(kV)

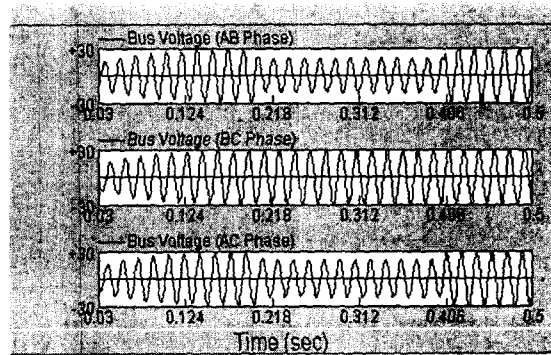


그림 4.3(c) 선간 전압(kV)

그림 4.4 (a)는 FCL 인터페이스에 의한 전류파형을 나타낸다. 고장상 a의 고장전류가 8kA에서 600A 정도로 제한되었음을 볼 수 있다. 그림 4.4(b)와 (c)는 각각 상전압과 선간전압 파형을 나타내는데 고장이 적용된 200ms 동안에 전압저하 현상 없이 전압이 안정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

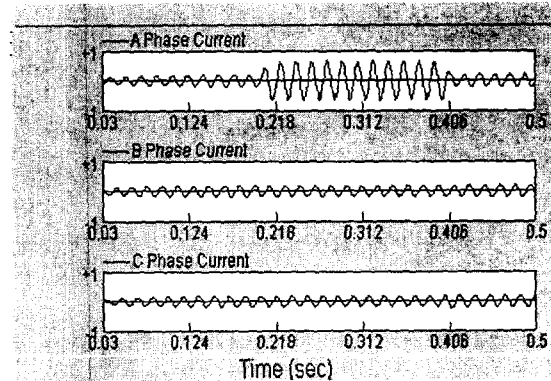


그림 4.4(a) 상 전류(kA)

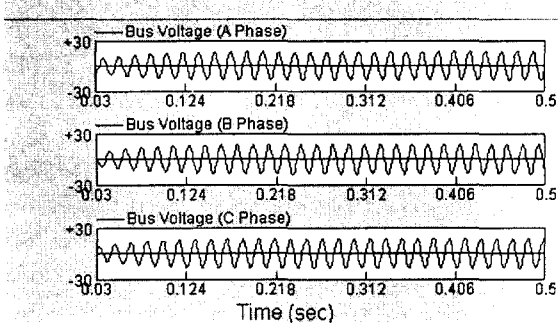


그림 4.4(b) 상 전압(kV)

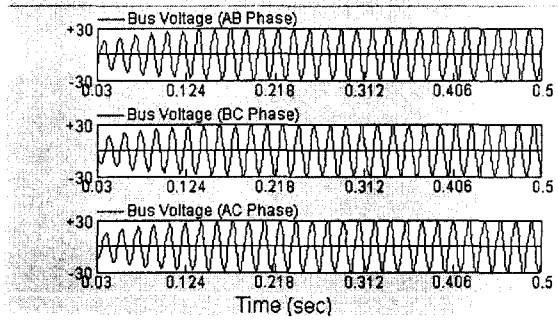


그림 4.4(c) 선간 전압(kV)

또한 전압저하를 저감시키는 FCL의 성분 중 L과 C는 공진조건에 맞게 무한한 리액턴스 값이 가능하며 그림 4.5에서처럼 리액턴스가 클수록 고장전류 제한효과는 증가하며 그만큼 또 다른 과도현상을 축소시켜주기 때문에 리액턴스 값이 클수록 좋다.

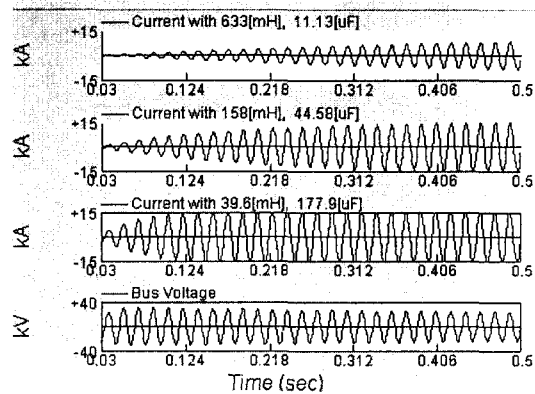


그림 4.5 다양한 리액턴스 값에 의한 고장전류 형태와 동일한 전압보상 효과

그러나 L값이 너무 커지면 배전 손실이 증가하게 되고 C값이 너무 작게 되면 Arrestor의 보호용량 값이나 리액터와 커패시터의 공칭전압이 작아질 뿐만 아니라 대용량 부하모터의 기동시에 철공

진이 발생할 수 있다. 따라서 L과 C로 이루어지는 이러한 FCL의 구조가 계통상에서 다른 영향을 주지 않은 채 전압저하를 저감시키기 위해서는 적절한 범위내의 L과 C값을 선택하는 것이 중요한 문제라 할 수 있다.

5. 결론

최근의 전력계통 환경에서 전력품질 개선의 문제는 매우 중요한 관심중의 하나이다. 본 연구에서 제안된 고장전류 제한 방법에 의한 전력품질 개선 방안은 배전계통에서 발생하는 전압저하 문제를 제어시스템이나 다른 전력전자 장비 없이도 해결할 수 있는 장점을 가지고 있으며 수행한 모의실험을 통해서 그 방법을 증명하였다. 즉, 배전계통에서 발생할 수 있는 불평형 단락사고에 의해서 부하 모선에 전압강하가 발생하더라도 FCL 인터페이스에 의해서 전압이 안정적으로 복구됨을 확인하였다.

이와 같은 고장전류제한에 의한 전압저하 보상은 적절한 L-C의 공진효과와 Surge Arrestor의 특성을 이용하여 이루어 질 수 있었으며 FCL의 능동적인 동작에 의해 다른 제어나 접호가 필요 없어서 구성이 간단하고 그로인해 UPS, DVR 등과 같은 다른 장비 인터페이스에 의한 방법보다 경제적인 효과가 크다는 것을 직관적으로도 쉽게 알 수 있다.

그러나 적절한 L과 C의 값을 선정하는 문제가 있어서 리액턴스 값을 크게 하기 위하여 인덕턴스를 증가했을 경우 배전 손실이 증가할 수 있고, 반대로 C를 크게 했을 경우 직렬형태의 이러한 C에 의해서 모터 기동시에 철공진이나 차동기 공진이 발생할 수 있는 가능성이 있다는 것은 FCL 인터페이스 방법의 단점이 아니라 할 수 없을 것이다.

물론 여기에서는 여러 가지 L, C값들을 적절히 변화를 주어 모의실험을 하였으며 전압저하 현상을 감소시키는 것에는 모두 같은 결과를 가져다준다는 것을 이미 확인하였지만 본 논문에서 확인하지 않았던 전력손실이나 과도현상 같은 FCL 투입에 의한 또 다른 부하측의 영향을 분석할 필요가 있으며 FCL 인터페이스에 의한 실질적인 경제적 효과를 산출하는 것도 실제 현장에 대한 적용 가능성을 고려할 때 중요한 과제라 할 수 있을 것이다.

이러한 것들은 본 논문이 지금까지의 분석과 결과를 토대로 앞으로 배전계통에서 전압저하에 대한 새로운 현상을 발견하고 분석해야 할 향후의

연구과제로 남겨 두기로 한다.

참 고 문 헌

- [1] T. H. Ortmeier, T. Hiyama, H. Salehfar, "Power Quality Effect of Distribution System Fault", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 5, 1996, pp. 323, 329.
- [2] Mark F. McGranaghan, David R. Mueller, Marek J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems", *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. 29, No. 2, March/April 1993.
- [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. Melhorn, Timothy D. Davis, George E. Beam, "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] Mark McGranaghan, Bill Roettger, "Economic Evaluation of Power Quality", *IEEE Power Engineering Review*, February 2002, pp. 8-12