

배전계통에서의 전압저하 저감방법에 관한 연구

(The Study for Mitigating Voltage Sags 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 changing the distribution system like spot network, on-site generation.

1. 서론

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.

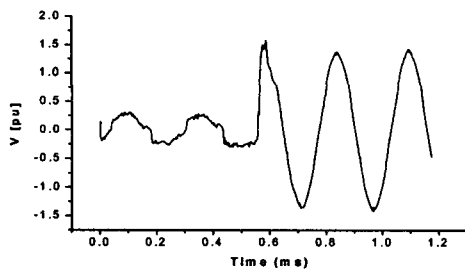


그림 1.1 단락회로 고장에 의한 전압저하

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 크게 4가지 형태로 분류되는데 어떠한 방법을 선택할 것인지의 사용자의 요구에 달려있지만 선택하는 방법에

따라 부가되는 비용과 효과가 많은 차이가 있으므로 각각의 장단점들을 충분히 이해할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 전압저하 완화 방법들의 일반적인 개요를 살펴본 후 그 중 배전 계통을 변화시켜 전압저하를 완화시키는 방법에 초점을 두었다. 특히 부분 네트워크(Spot Network)설정과 지역발전기(Local Generation)의 설치를 각각 적용하여 두 가지 방법이 적용된 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 전압저하가 완화되는지를 확인하였다. 비교방법은 3상 단락사고 발생 시 부하에 공급되는 전압의 크기를 고장점 거리의 함수로 표현하여 해석하였다.

2. 배전계통에서 전압저하 특성

전압저하는 계통 고장 시에 부하가 연결된 모선의 전압의 양을 의미하는 전압 크기와 고장에 의한 전압크기가 지속되는 시간을 의미하는 지속시간(Duration)으로 특징지어지며 주로 그 특성들이 부하장비나 설비에 영향을 미치므로[2][3] 전압저하를 완화시키기 위해서는 전압저하의 특성을 해석할 필요가 있다.

2.1. 전압크기

방사(radial)전력계통에서 전압저하의 크기를 정량화하기 위해서 그림 2.1과 같은 전압 분배 모델이 사용된다.

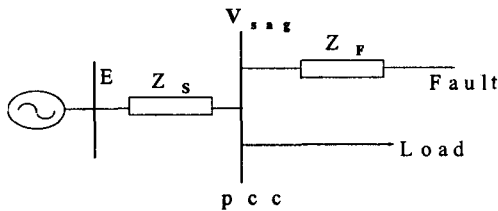


그림 2.1 전압저하에 대한 전압분배 모델

3상 단락사고가 발생하고 부하전류를 무시하여 부하와 pcc사이에 전압강하가 없다고 가정하면 부하전압 V_{sag} 는 다음과 같다(기호의 정의는 표 2.1과 같음).

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} E \quad (2.1)$$

위 식으로부터 Z_F 가 적을수록 그리고 Z_S 가 클수록 전압크기가 작아져 전압저하 현상이 심해짐을 알 수 있다. 또한 위 식은 전압저하의 크기를

고장 점까지의 거리의 함수로서 표현할 수 있다.

$$V_{sag} = \frac{zL}{Z_S + zL} \quad (2.2)$$

표 2.1 기호의 정의

pcc (point-of common coupling)	
Z_S	pcc에서 전원임피던스(Ω)
Z_F	pcc와 고장점사이의 임피던스(Ω)
E	전원전압(pu)
V_{sag}	pcc 전압(pu)
z	단위길이당 피더 임피던스(Ω/km)
L	pcc와 고장점사이의 길이(km)

2.2. 전압저하 지속시간

전압저하는 보호장비가 고장전류를 차단하지 않는 한 계속되므로 고장전류가 차단되어 전압이 원래의 값으로 복귀하게 될 때까지의 시간을 전압저하 지속시간이라 한다. 표 2.2에서처럼 고장을 제거하는 장비들은 여러 가지가 있으며 각각의 장비들은 고장을 제거하는데 걸리는 최소시간을 가지고 있다. [11]

따라서 단락사고 고장 발생 시에 어떤 보호장비를 선택하고 고장제거시간을 어떻게 정하느냐에 따라 전압저하 지속시간이 설정된다.

표 2.2 보호장비들의 고장 제거 시간

보호장비	고장제거시간(cycle)		
	최소설정시간	지연시간	재투입 수
한류(current limiting)퓨즈	0.5	0.5-60	없음
방출(expulsion)퓨즈	0.25 이하	0.25-60	없음
전자 리클로우저(recloser)	3	1-30	0-4
유입차단기(O. C. B)	5	1-60	0-4
진공차단기(V. C. B) 또는 SF6 가스차단기	3	1-600	0-4

2.3. 전압저하 특성이 설비에 미치는 영향

계통에서 단락사고가 발생하게 되면 모선 전압의 감소로 계통과 연결된 설비는 영향을 받게 되고 설비 내에 설치된 각종 장비 또한 영향을 받게 될 것이다. 그림 2.2와 같은 주요한 부하설비장비들의 장비민감도 곡선을 살펴보면 전압저하에 의한 전압크기와 지속시간이 어떻게 장비에 영향을 주는지 쉽게 알 수 있다. [3]

3. 전압저하 지감방법

전압저하를 완화시키는 방법들은 여러 가지가 있는데 그림 3.1처럼 크게 4가지 형태로 분류할 수가 있다.

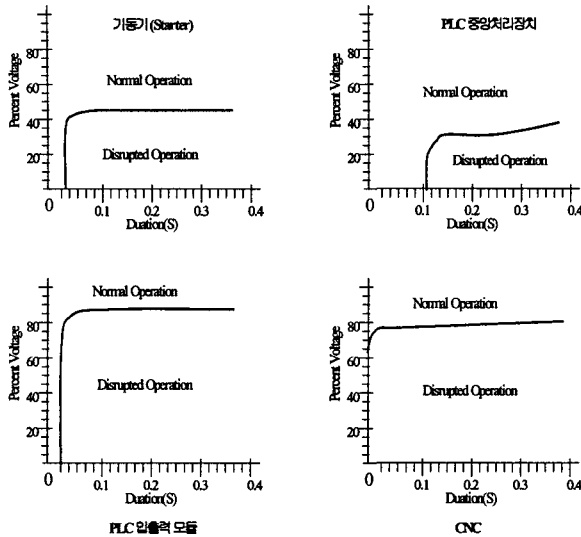


그림 2.2 제어장비들에 대한 장비민감도 곡선

단락사고가 발생하면 모선의 전압이 감소하고 따라서 설비의 공급전압도 감소할 것이다. 이 때 전압이 0.1초 동안 70%로 감소한다고 하면 위의 그림에서 알 수 있는 것처럼 설비 내에 있는 PLC 입출력 모듈과 CNC가 동작불능이 되고 그로 인해 전체 설비가 영향을 받는다면 결과적으로 막대한 경제적 손실을 초래할 것이다.

따라서 사고가 발생하더라도 설비가 영향을 받지 않기 하기 위해서는 전압의 크기를 동작점 이상의 크기로 유지시키거나 전압저하의 지속시간을 동작점 안으로 단축시켜 줘야 한다.

설비 내에 있는 어떤 하나의 장비만 영향을 받고 설비에는 큰 영향을 미치지 못한 경우에는 그 장비만 전압저하 대하여 보호방지를 해 주면 될 것이고 다수의 장비들이 영향을 받는 경우에는 설비전체에 대하여 보호방책을 세워야 할 것이다.

단락사고에 의한 전압저하 현상을 감소시키기 위한 방법은 여러 가지가 있지만 그 방법들은 한결같이 전압의 크기와 전압저하 지속시간을 어떻게 변화시켜주느냐 하는 것으로 귀결된다. 다만 보호하고자 하는 대상이 장비 또는 설비 아니면 계통이나 하는 것에 따라 경제적인 면이 현격히 차이가 나므로 보호대상과 그에 따른 보호방법이 다를 뿐이다.

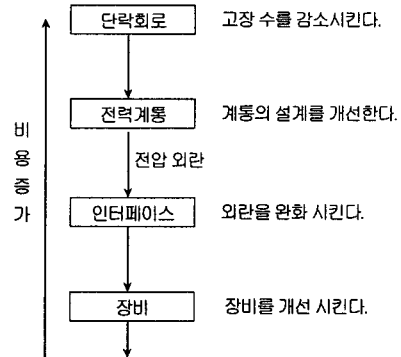


그림 3.1 전압저하 완화 방법의 분류

첫째, 계통에서 단락회로 고장의 수를 감소시키는 것은 고장을 일으키는 원인을 원천적으로 제거시키는 것으로서 전압저하의 빈도 수를 감소시키는 것뿐만 아니라 정전 수를 감소시키는 결과도 가져온다. 가공선을 지중 케이블로의 대체, 선로 근처의 수목에 대한 가지 손질, 차폐선 설치, 절연강도 증가 등에 의한 방법으로 이루어질 수 있는데 계통환경 전반에 걸친 작업이므로 상당한 비용이 부가되어 경제적인 측면을 고려할 때 그리 효율적이지는 못하다.

둘째, 전력계통을 변화시키는 방법은 부하가 연계된 계통구조를 변화시키는 것으로, Normally Open Switch, 부하 절환(Load Transfer)스위칭, 계통 병렬운전, 부분 네트워크, 민감한 부하 근처의 지역 발전기를 설치 등에 의해 이루어진다.

이 방법은 계통상에서 발생한 고장에 의한 전압 감소를 보충하여 설비 쪽에 양질의 전력을 효과적으로 공급해 줄 수 있기 때문에 전압외란에 민감하게 반응하는 설비가 많이 연결되어 있는 배전계통에 적합한 방법이다.

셋째로는 계통과 부하장비 사이에 전압외란을 적절히 차단시킬 수 있는 어떤 인터페이스를 설치하는 방법이 있다. 즉, 계통에 연결된 많은 부하설비들 중에서 어떤 특정한 부하가 자주 외란에 영향을 받을 경우 그 부하설비를 개별적으로 보호하기 위한 수단으로 보통 VSC(Voltage-Source

Converter), DVR(Dynamic-Voltage-Restore), UPS(Uninterruptable-Power-Supply), MG(Motor-Generator)set, 에너지 저장장치 등과 같은 충격완화장치들을 설치하는 것이다.

이 방법은 사용자가 관심 있는 설비에 대해서 직접 상황에 대처할 수 있는 장소에 설치되어 감시 및 제어가 수월하다.

마지막으로 장비를 개선시키는 방법은 장비의 특성사항을 변화시켜 전압외란에 대한 장비의 면역성을 증가시키는 것으로 경제적으로는 가장 효과적인 방법이라 할 수 있지만 장비자체가 미리 전압저하를 고려하지 않은 상태로 제조되어 설치되기 때문에 사용자가 장비를 재 설계한다는 것은 사실상 쉬운 일이 아니다.

최근의 연구동향은 계통의 구조를 변화시키는 방법과 장비 인터페이스 방법으로 많이 구체화되고 있는 추세이며 [7][8][12], 본 논문에서는 부분 네트워크와 지역발전기를 이용한 계통 구조 변화 방법에 초점을 두었다.

3.1. 부분 네트워크 (Spot Network)

부분 네트워크는 그림 3.2처럼 분리되어 있는 두 개 또는 그 이상의 다른 버스들을 하나의 버스에 같이 연결시킨 계통을 말한다.

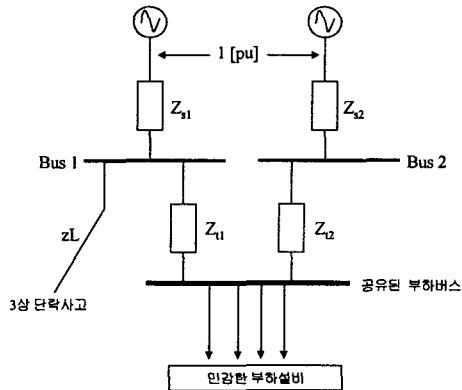


그림 3.2 부분 네트워크 구성

버스 1과 연결된 피더의 거리 L [km]에서 3상 단락사고가 발생하고 버스 2의 전원이 버스 1에 영향을 주지 않음을 가정하면 버스 1에서의 전압은 그림 2.1에서처럼 구할 수 있다.

$$V_1 = \frac{zL}{zL + Z_{S1}} \quad (31)$$

또한 두 개의 전원이 독립적이고 따라서 고장에 의한 버스 2에서 전압강하가 없다고 한다면 공유된 부하버스

에서의 전압은 다음과 같다.

$$V_{\text{sag}(\text{load})} = V_1 + \frac{Z_{t1}}{Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{s2}} (1 - V_1) \quad (32)$$

Z_{t1}, Z_{t2} : 변압기 임피던스
 Z_{s1}, Z_{s2} : 전원 임피던스

따라서 부분 네트워크 설정이 안되었을 경우의 부하 버스 전압은 식 3.1과 같고 네트워크 설정시의 전압은 3.2와 같다.

3.2. 지역 발전 (Local Generation)

지역발전을 한다는 것은 정전이 발생할 경우에도 전력을 지원 공급해주기 때문에 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있는 방법이다.

또한 그림 3.3처럼 방사(Radial) 배전계통에 지역발전기가 설정되었을 경우 크게 두 가지 방법의 의해 전압저하를 완화시켜 준다.

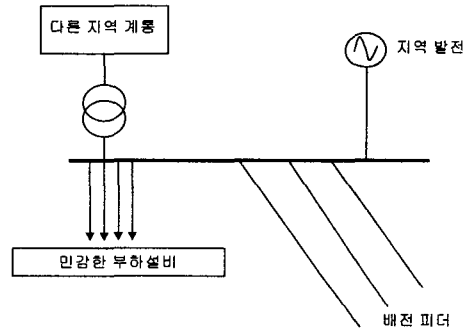


그림 3.3 지역발전 연결

발전기는 배전 피더상에 고장용량을 증가시켜 전압저하를 완화시키는데 특히 정상동작 상태가 취약한 계통에 적합하다. 또한 다른 지역계통에서 고장이 발생하더라도 부하버스의 전압을 유지시켜 주므로 전압저하를 완화시킬 수 있다. 이러한 효과를 전압의 크기로 정량화하기 위하여 지역발전이 설정된 계통을 그림 3.4처럼 등가회로로 표현할 수 있다.

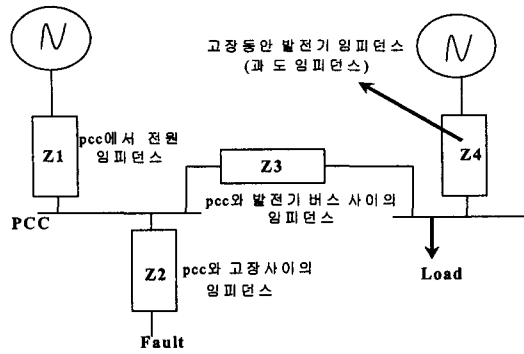


그림 3.4 지역발전에 대한 등가회로

위의 그림에서 부하 버스의 전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(1 - V_{\text{sag}(\text{load})}) = \frac{Z_4}{V_3 + V_4} (1 - V_{\text{pcc}}) \quad (3.3)$$

$$\therefore V_{\text{pcc}} = \frac{Z_2 L}{Z_1 + Z_2 L} \quad L : \text{고장점 거리}$$

$V_{\text{pcc}} = 0$ 일 경우에도 즉, 원래 부하에 전원을 공급하던 경로에 정전이 발생할 때,

$V_{\text{MIN}(\text{load})} = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$ 가 되어 발전기 과도임피던스와 연결 버스사이의 임피던스 크기에 따른 전압을 부하에 공급해 줄 수 있다.

4. 사례 연구

사례연구는 기술한 두 가지 방법을 각각 분리하여 모의실험을 통해 이루어 졌으며 각각의 방법이 적용된 경우와 그렇지 않은 경우의 결과를 비교 분석하여 전압 저하가 완화되는지 검증하였다. 모의실험의 결과치는 부하가 연결된 모선의 다른 피더상에서 단락사고가 발생했을 때 고장점 거리에 따른 부하모선의 전압크기로 출력했으며 모의실험 도구로는 MATLAB M-file editor 프로그램을 사용하였다.

4.1. 지역 발전 (Local Generation)

모의계통은 그림 4.1과 같고 계통 데이터는 표 4.1과 같다.

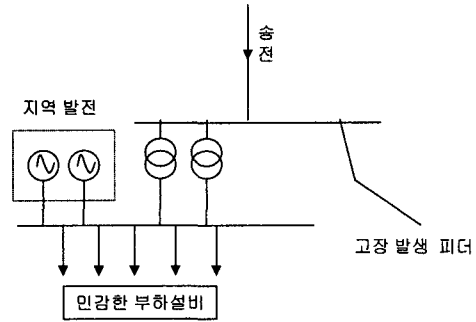


그림 4.1 지역발전이 설정된 배전계통

표 4.1. 계통 데이터 (1)

변수	값	변수	값
변압기 전압	22.9/6.6 KV	발전기용량	20 MVA
피더 임피던스	0.3Ω/km	변압기 1차측 고장용량	900 MVA
발전기 과도 리액턴스	17%	변압기 2차측 고장용량	200 MVA

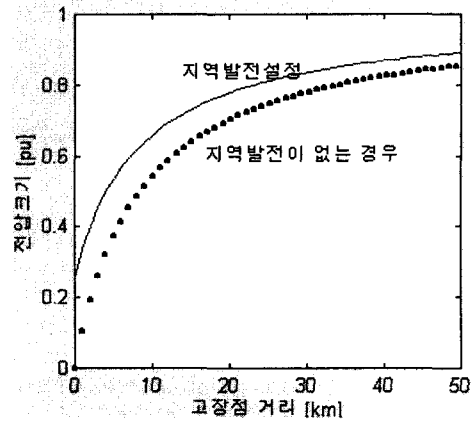


그림 4.2 지역발전 유무에 따른 전압크기

그림 4.2는 지역발전을 한 경우와 그렇지 않은 경우의 부하버스 전압을 출력한 것인데 전압크기는 고장점 거리가 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 왜냐하면 거리가 늘수록 피더 임피던스가 커지기 때문이다. 또한 지역발전을 한 경우에 같은 고장점 거리에서 전압의 크기가 더 높게 나타남을 알 수 있으며 모선에서의 사고로 정전이 발생하더라도 지역발전에 의해 전압이 유지됨을 알 수 있다. 위의 계통에서 정전 시 최소 전압 값은 0.26 [pu]이며 그림 4.3과 표 4.2에서 보여지듯 발전용량을 높이든지 아니면 발전기 수를 늘려서 전압저하 시 보상전압과 정전 시의 최소 전압 값을 상승시킬 수 있다.

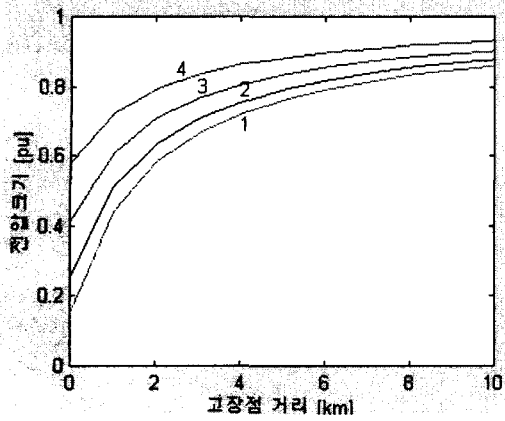


그림 4.3 발전기 수에 따른 부하전압크기

표 4.2. 발전기 수에 따른 전압크기

발전기 수	최소 전압 값 [pu]	고장점 거리에 따른 전압 [pu]		
		1km	3km	10km
1	0.1513	0.4410	0.6678	0.8627
2 (모의계통)	0.2576	0.5110	0.7094	0.8799
3	0.4097	0.6112	0.7689	0.9045
4	0.5815	0.7244	0.8362	0.9323

4.2. 부분 네트워크 (Spot Network)

모의 대상은 그림 4.4와 같고 계통 데이터는 표 4.3과 같다.

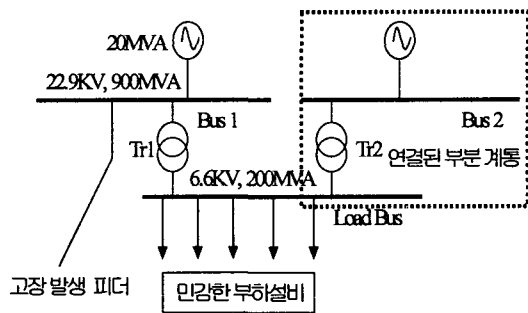


그림 4.4 부분 네트워크 계통도

표 4.3. 계통 데이터 (2)

변수	값	변수	값
변압기 임피던스 (Tr1)	20%	변압기 임피던스 (Tr2)	20%
피더 임피던스	0.3Ω/km	발전기 과도 리액턴스	17%

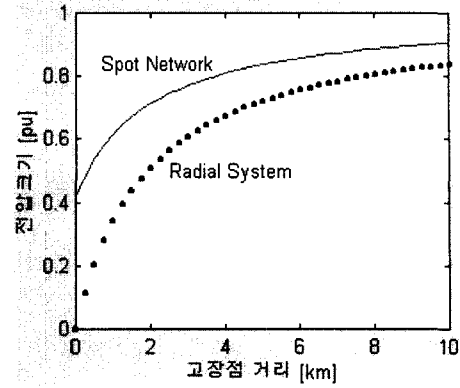


그림 4.5 부분 네트워크 유무에 따른 전압크기

그림 4.5는 부분 네트워크를 설정한 경우와 그렇지 않은 경우의 부하버스 전압을 출력한 것이며 마찬가지로 고장점 거리가 증가할수록 전압이 커짐을 알 수 있다. 또한 부분 네트워크를 설정한 경우에 같은 고장점 거리에서 전압의 크기가 더 높게 나타남을 알 수 있으며 모선에서의 사고로 정전이 발생하더라도 연결된 다른 계통에 의해 전압이 유지됨을 알 수 있다. 위의 계통에서 정전 시 최소 전압 값은 0.42 [pu]이며 그림 4.6과 표 4.4에서 보여지듯 연결되는 계통의 2차 변압기 임피던스에 따라 전압저하 시 보상전압과 정전 시의 최소 전압 값을 상승시킬 수 있다.

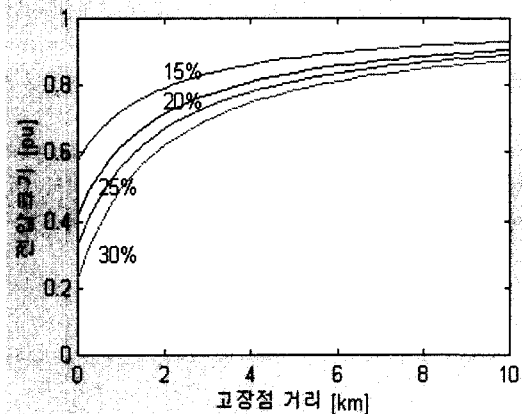


그림 4.6 2차 변압기 임피던스에 따른 전압크기

표 4.4. 2차 변압기 임피던스에 따른 전압크기

% T _{r2}	최소 전압 값 [pu]	고장점 거리에 따른 전압 [pu]		
		1km	3km	10km
15 %	0.5792	0.6274	0.6968	0.8165
20 % (모의계통)	0.4197	0.4862	0.5819	0.7469
25 %	0.3291	0.4059	0.5166	0.7074
30 %	0.2298	0.3180	0.4451	0.6641

즉, 연결되는 계통의 변압기의 정격용량이 적을수록 임피던스가 증가하여 전압저하에 대한 보상 전압이 감소하게 된다. 따라서 부분 네트워크 구성 시 임피던스가 같은 변압기나 더 적은 임피던스를 갖는 변압기가 있는 계통에 네트워크를 설정하는 것이 보다 더 효과적임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 배전계통에서 발생하는 단락사고에 의한 전압저하 현상을 저감시키는 두 가지 방법을 제안하였다. 그것은 배전계통의 구조를 변화시키는 방법 이었으며 또한 두 가지 방법 모두 전압저하 현상을 저감시킨다는 것을 모의실험을 통하여 확인하였다. 또한 지역 발전을 통한 방법에서는 설치되는 발전기의 용량과 수가 증가할수록 전압저하 저감의 효과가 높았고 부분 네트워크에서는 2차 변압기의 임피던스가 적을수록 전압보상이 뛰어났다는 것도 확인하였다.

이상과 같은 연구 결과는 다수의 부하설비가 연결된 배전계통상에 잦은 전압의란이 발생할 경우에, 소요되는 비용과 효과측면을 고려하여 경제적인 실리가 있다고 판단될 때에 배전계통의 신뢰도 향상에 기여할 수 있는 방법이라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] T. H. Ortmeyer, 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 Quiaia, "Reducing Voltage Sags Through Fault Current Limitation", *IEEE Transaction On Power Delivery*, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 12-17
- [8] Sang-Hoon Lee, Jae-Ho Choi, "Instantaneous Voltage Sag Corrector in Distribution Line Using Series Compensator", *Trans. KIEE*, Vol. 50B, No. 1, January 2001, pp. 15-22.
- [9] Math H. J. Bollen, "Fast Assessment Method for Voltage Sags in Industrial Systems", *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. 32, No. 6, November/December 1996.
- [10] Ma가 McGranaghan, Bill Roettger, "Economic Evaluation of Power Quality", *IEEE Power Engineering Review*, February 2002, pp. 8-12
- [11] Carl Becker, William Braun Jr., Kenneth Carrick, Tom Diliberti, Cliff Grigg, Joe Groesch, Bill Hazen, Tom Imel, Don Koval, David Mueller, Tony St. Jhon, Larry E. Conrad, "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags(Dips) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book", *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. 30, No. 3, May/June 1994.
- [12] Sang-Yun Yun, Jung-Hwan Oh, Jae-Chul Kim, "Countermeasure of Voltage Sag in Radial Power Distribution System using Load Transfer Switching", *Trans. KIEE*, Vol. 49A, No. 11, NOV. 2000.