

배전계통에서의 전압변동의 원인 및 대책

이승요, 최규하

(건국대학교 전기공학과)

1. 서론

마이크로프로세서를 사용하여 제어하는 부하장치와 같이 전원의 외란에 민감한 부하 설비들이 많이 등장하면서 “전력품질(power quality)”이란 용어는 1980년대 후반 이후 전력산업 분야에서 가장 빈번하게 사용되고 있는 용어중의 하나가 되어 왔다. 이러한 전력품질은 계통의 전압품질(voltage quality)에 직접적 영향을 받게 되는데 전압품질은 전압의 변동 및 변형이 어느 정도의 크기로 얼마만큼의 시간동안 발생했는가에 따라 결정될 수 있다. 전압변동은 크게 단기간동안의 전압변동과 장기간동안의 전압변동으로 대별될 수 있고 전자는 순간적인 전기적 차단(interruption), 전압강하(sag 또는 dip) 및 전압상승(swell) 등으로 분류할 수 있으며, 후자는 과전압, 부족전압 및 지속적인 전기적 차단(sustained interruption) 등으로 설명될 수 있다. 이외에도 고조파 전류의 계통 유입시 계통 임피던스의 전압강하를 통하여 발생하는 고조파 전압 또는 정류회로에서 전류중복으로 인한 노치(notch) 등은 전압파형이 변형되어 전압의 품질이 저해되는 경우에 해당하는 현상들로 볼 수 있다.^[1]

이와 같은 계통의 전압변동 현상은 그 전압 변동 정도와 그 지속 시간에 따라 수용가 설비에 악영향을 끼치는데 생산공정의 경우 공정제어용 컴퓨터나 전동기를 다수 사용하고 있으며 전원측 전압저하 현상의 발생으로 이러한 기기들이 정지하게 되면 전 생산라인을 정지시켜야 하는 문제를 야기시킬 수 있고 이와 같이 생산라인이 정지하게 되면 재가동시 심지어 12 시간이 소요되는 경우도 있다. 또한 일반 사무실의 컴퓨터 및 각종 사무용 기기 등에 전압강하가 발생되면 현재 처리중이던 모든 데이터가 상실되고 이를 복구시키는 데 상당시간이 소요되며 어떤 경우에는 완전한 복구가 이루

어지지 않는 경우도 있다. 기타 설비시설에 대해 전압강하 현상이 미치는 예로서 전자 접촉기를 사용하는 펌프용 전동기의 정지, 상가나 도로, 스포츠 시설 등에 사용되는 야간 조명용 고압방전등의 점멸 등을 들 수 있다.

특히 컴퓨터와 같은 부하에서는 전압강하폭이 정격전압의 10[%]이상 그 지속 시간이 반주기(8.3[msec]) 이상 되면 피해를 받게되고 민감한 가변속 구동의 경우에는 공급전압이 정상전압의 90[%]에서 4~20 싸이클 지속되면 모터가 정지하는 경우도 있다.^[2] 또한 전원측에 발생하는 전원 전압의 이상현상으로 3상 시스템의 경우 임의의 상전압이 커지거나 작아지게 되는 전압변동 현상이 발생하게 되면 3상 전원은 불평형 전원시스템이 되고 이로 인한 불평형 전압이 부하에 인가되는 경우 전력 시스템에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 예로서 3상 전원의 불평형은 정지형 컨버터와 같은 비선형 부하가 계통에 연결되어 있는 경우 특성화되지 않은 저주파수의 고조파를 발생시키고 이는 전력계통에 물려있는 각종 컨버터 시스템의 필터나 스위치의 정격용량을 증가시키는 요인으로 작용하게 된다. 또한 불평형 전원이 인가되는 전기기계에서 낮은 역상분 임피던스로 인해 많은 양의 역상분 전류가 발생하여 기계의 손실을 증가시킬 뿐만 아니라 토크의 감소를 초래한다.^[3~4] IEC에서는 유도전동기에 대한 허용 전압불평형을 1[%]로 제한하고 있다. 그리고 기존의 연구결과들을 토대로 연속적인 전압불평형에 관한 제한은 5[%], 전류불평형에 관한 제한은 10[%]로 보통 제안되고 있다.^[5~6]

여기에서는 이와 같이 전력품질에 직접적으로 연관되어 전압품질에 영향을 끼치는 요소로서 계통에 발생하는 전압변동의 유형과 원인을 주로 살펴보고 이에 대한 대책 방안에 관하여 기술하고자 한다.

2. 전압변동의 유형

IEEE SCC22(Standards Coordinating Committee 22)는 미국내에서 전력품질의 기준을 일원화하기 위한 노력을 하고 있으며 IEC 및 CIGRE와의 연계를 통한 국제적인 통합 방안을 위해서도 노력하고 있다. 또한 현재 전력품질에 관한 용어 정의의 표준화가 아울러 이루어지고 있다. 전압변동에 관한 유형을 살펴보면 전압변동에는 앞에서 언급한 바와같이 단기간전압변동(short-duration voltage variations)과 장기간전압변동(long-duration voltage variations)현상을 생각할 수 있고 이를 정리하여 나타내면 표 1과 같다.⁽¹⁾ 단기간 전

표 1 전압변동의 유형

유형		지속시간	전압변동폭
단기간 변동	순시변동 (instantaneous)	차단 (interruption)	0.5~30 사이클 0.1 pu 미만
		전압강하 (sag,dip)	0.5~30 사이클 0.1~0.9 pu
		전압상승 (swell)	0.5~30 사이클 1.1~1.8 pu
	순간변동 (momentary)	차단 (interruption)	30 사이클~3초 0.1 pu 미만
		전압강하 (sag,dip)	30 사이클~3초 0.1~0.9 pu
		전압상승 (swell)	30 사이클~3초 1.1~1.4 pu
	일시변동 (temporary)	차단 (interruption)	3초~1분 0.1 pu 미만
		전압강하 (sag,dip)	3초~1분 0.1~0.9 pu
		전압상승 (swell)	3초~1분 1.1~1.2 pu
장기간 변동	지속차단(interruption, sustained)	1분 초과	0.0 pu
	부족전압(undervoltage)	1분 초과	0.8~0.9 pu
	과전압 (overvoltage)	1분 초과	1.1~1.2 pu
전압 불평형	전압불평형 (voltage unbalance)	정상상태	0.5~2 %

압변동은 주로 시스템 고장이나 큰 기동전류를 필요로 하는 부하의 투입 또는 전력선의 일시적인 단선 등으로 인해 발생하는 현상으로 전압변동의 각 형태는 또 다시 그 전압변동의 지속시간에 따라 순시(instantaneous), 순간(momentary), 일시(temporary)와 같은 용어를 사용하여 구분 짓고 있다. 그리고 장기간 전압변동은 1분을 초과하여 그 실효치의 값이 변동하는 경우를 말하며 이는 일반적으로 시스템의 고장이 그 원인이라기 보다는 시스템 상에서 부하변동이나 시스템의

스위칭 동작으로 인해 발생하는 것으로 볼 수 있다. 3상 시스템의 경우에 있어서 임의의 상에 전압변동이 발생하면 전압 불평형으로 되는데 정상상태에서 0.5~2(%)의 전압변동폭이 발생하는 경우로 간주한다.

3. 전압 변동의 원인^(1,2)

3.1 단기간 전압변동의 원인

3.1.1 차단 (interruption)

차단은 전원전압 또는 부하전류의 변동시간이 1분을 초과하지 않는 시간 내에서 그 크기가 0.1 pu 미만으로 되는 경우를 말하며 전력 시스템 또는 장치의 고장이나 제어 상의 기능 장애로 인해 나타날 수 있다. 상용 전원시스템에서 고장으로 인한 차단의 시간간격은 보호장치의 동작 시간에 의해 결정된다. 일반적으로 순시 재폐로(instantaneous reclosing)는 30 사이클 이하의 차단을 발생시키게 되고 재폐로의 재폐로가 그 이상 지연되는 경우 그 시간 간격에 따라 순간(momentary)인가 일시(temporary)인가를 결정하게 된다.

그림 1은 순간 차단의 예로서 약 3 사이클 동안 약 20(%)의 전압 강하가 선행되어 발생하고 재폐로기가 다시 닫힐 때까지 약 1.8초의 시간 동안 전압의 크기가 영으로 강하된 경우를 보여주고 있는데 그림에서 상단은 실효치로 나타난 전압의 크기변동을 나타내고 하단은 시간축 상에서 사고 발생 시점의 파형을 약 200(ms)까지 확대하여 나타낸 것이다.

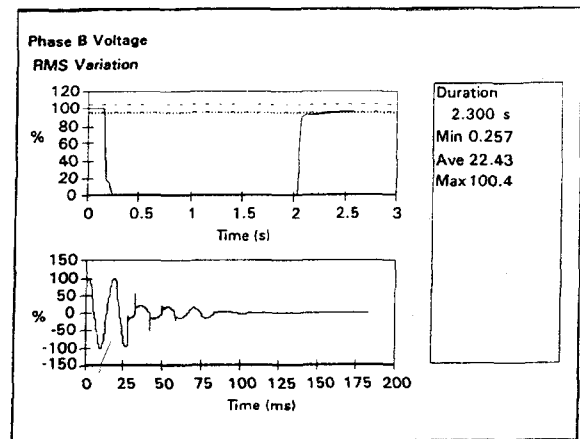


그림 1 고장과 재폐로기의 동작으로 인한 순간 차단의 예

3.1.2 전압강하(sag 또는 dip)

전압강하는 0.5 사이클에서 1분까지의 기간동안 실효치 전압이 0.1~0.9 pu 사이로 강하되는 것을 말한다. 전압강하는 일반적으로 시스템 고장과 연관되지만 중부하의 에너지 공급이나 대용량 전동기의 기동시에 발생할 수도 있다.

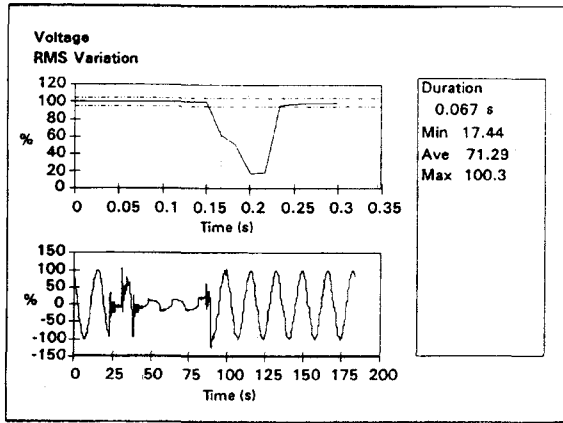


그림 2 1선지락에 의해 발생하는 전압강하의 예

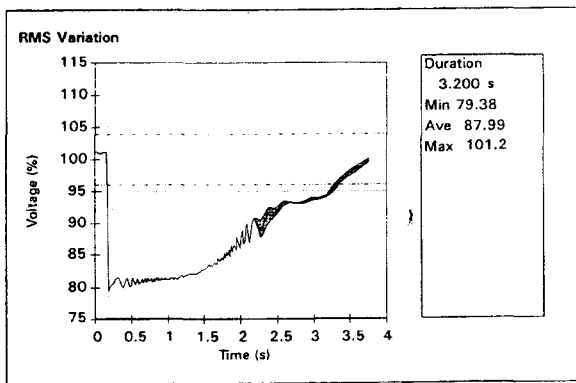


그림 3 전동기 기동으로 인한 일시 전압강하의 예

그림 2는 같은 변전소로부터 하나의 급전선(feeder)에 1선 지락이 발생하여 생겨날 수 있는 전형적인 전압강하의 예로서 그림에서는 80(%)의 전압강하가 변전소의 차단기가 고장전류를 차단할 때까지 약 3 사이클 동안 발생되고 있음을 나타내고 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 그림의 상단은 실효치로 표현된 전압크기의 변동을 나타내고 있으며 하단의 그림은 이러한 현상을 보여주기 위해 시간축 상에서 확대한 전압파형의 모습을 나타낸다. 일반적으로 고장 배제 시간은 고장전류의 크기와 과전류 보호의 형태에 따라 3~30 사이클 정도이다.

그림 3은 대용량 전동기의 기동과정을 나타내는 것으로 유도전동기 기동시에는 전부하 전류의 6~10배 정도의 전류가 흐른다. 만약 기동전류의 크기가 시스템의 고장전류에 상응할 만큼 큰 값이 되면 전압강하가 크게 나타날 수 있는데 그림에서는 전동기 기동으로 인한 전압강하가 80(%)에까지 이르고 점차적으로 약 3초의 시간이 경과된 후 정상적인 값으로

회복되고 있음을 보여주고 있다.

3.1.3 전압상승(swell)

전압상승은 전압의 실효치가 0.5사이클~1분 동안 1.1~1.8 pu 사이의 값으로 증가하는 경우를 말한다. 전압강하와 마찬가지로 전압상승은 보통 시스템 고장조건과 관련되어 나타나지만 통상 발생빈도는 전압강하보다 적다. 전압상승이 발생하는 한 예는 3상 시스템에서 1선지락이 발생했을 때 다른 상에 일어나는 전압상승을 생각할 수 있으며 그 사례는 그림 4에서 볼 수 있다. 1선지락에 의해서 야기되는 전압상승은 시간축 상의 0.15초~0.25초에서 발생하여 115(%)까지 그 실효치의 크기가 증가되는 형태를 그림 4의 상단 그림에서 보여주고 있으며 하단 그림은 이를 시간축 상에서 파형의 형태로 보여주고 있다. 전압상승은 또한 대용량 부하의 스위칭 오프시나 대용량 커패시터 뱅크에 에너지를 공급하는 경우에도 발생할 수 있다.

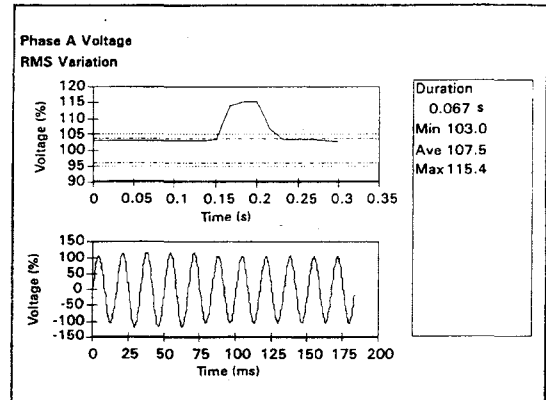


그림 4 1선지락에 의해 발생하는 한 상의 순시 전압상승의 예

3.2 장기간 전압변동의 원인

장기간 전압변동은 전압의 실효치가 1분을 초과하여 변동되는 경우를 말하는 것으로 과전압, 부족전압 및 지속 차단(sustained interruption)이 이에 해당한다.

3.2.1 과전압

과전압은 표 1에서와 같이 1분을 초과하여 교류전압의 실효치가 110(%) 이상 커지는 경우로 보통 부하 스위칭의 결과로 나타난다. 앞의 전압상승(swell)에서 언급한 것과 같이 대용량 부하의 스위치를 오프 시키거나 커패시터 뱅크에 에너지가 공급되는 경우에 해당한다. 그리고 시스템이 필요로 하는 전압조정을 하지 못하거나 전압제어가 부적절한 경우에도 과전압이 발생하며 또한 변압기의 부적합한 탭 설정으로도 나타날 수 있다.

3.2.2 부족전압

부족전압은 1분을 초과하여 교류 실효치 전압의 크기가 90[%] 이하로 줄어드는 경우를 말하며 부족전압이 발생하는 원인은 과전압이 발생하는 경우에 대하여 반대적인 현상으로 볼 수 있다. 즉, 부하 스위칭의 온이나 커패시터 뱅크 스위칭의 오프는 전압 조정장치가 전압의 크기를 정상 크기로 회복시키기 전까지 시스템 상에서 부족전압을 발생시키게 된다. 또한 과부하 회로도 부족전압을 발생시킬 수 있다.

3.2.3 지속 차단

시스템 이상현상 때문에 1분을 초과하는 시간동안 전원전압이 영으로 유지하는 경우를 지속 차단이라 한다. 1분 이상 지속되는 전압 차단은 종종 영구적인 차단 상태로 되어 자동적인 복구가 이루어지지 않는 경우도 존재하며 이러한 경우에는 시스템 복원을 위하여 수동조작이 필요하게 된다.

3.3 전압불평형

불평형의 정도는 대칭좌표성분을 이용하여 정의하는데 정상성분에 대한 역상성분 또는 영상성분의 비인 백분율로써 나타낸다. 또한 불평형은 전압의 평균값에 대한 비로써 표현하기도 하며 각 상 또는 선간 전압의 평균치를 각각 이용할 수 있다. 각 상 평균치를 이용하는 경우 각 상 전압에서 상전압의 평균치를 뺀 것의 절대값 중 가장 큰 값을 그 평균치로 나눈 것을 의미한다.

전압 불평형의 주요 원인으로는 3상 회로에 단상부하가 연결되거나 3상 커패시터 뱅크에 있어서 한 상의 퓨즈가 끊어지는 경우와 같이 불평형 부하 조건이 전력시스템 내에

형성되는 경우를 들 수 있으며 전력시스템 내에 1선지락과 같은 사고가 발생하는 경우에도 불평형 전압이 나타나게 된다.

4. 전압변동의 조사 사례

대규모의 전력품질 조사가 여러 국가에서 수행되어 왔으며 가장 최근 널리 알려진 북미지역의 전력품질조사(North American power quality survey)는 NPL(National Power Laboratory), CEA (Canadian Electrical Association), EPRI(Electric Power Research Institute)에 의해 수행되었는데 각 조사 보고서는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.⁽⁷⁻⁸⁾

■ NPL 조사 :

1990년부터 단상 시스템을 대상으로 전기적 외란 현상을 조사하여 전력 시스템의 전력품질에 관한 데이터 베이스를 구축하기 위해 NPL에 의해 5개년간 수행되었다. 이는 미국과 캐나다의 전역에 걸쳐 130개소의 벽면 콘센트에 모니터를 연결하여 조사하였으며 전체 1200 monitor months의 데이터가 얻어졌다(여기서, 1 monitor month는 1개의 monitor에서 1개월간 얻어지는 데이터의 취득을 나타내는 단위임).

■ CEA 조사 :

CEA에 의해 캐나다에서 전력품질의 일반적인 레벨을 결정하기 위해 1991년부터 3년간 수행되었으며 전체 550개소에서 각 25일 동안 측정되었다. 이 조사는 주거지, 상업지역 그리고 산업현장의 120[V], 347[V] 배전반에서 측정되었는데

표 2 각각의 조사에 사용된 전압변동의 유형과 지속시간

변동유형 \ 보고서	NPL 조사		CEA 조사		EPRI 조사	
	유형	전압변동	지속시간	전압변동	지속시간	전압변동
전압강하	87% 미만시	0.5~180사이클	92% 미만시	0.1 ~ 10초	90% 미만시	1사이클~1분
전압상승	-	-	104% 초과시	0.1 ~ 10초	110% 초과시	1사이클~1분
과전압	106% 초과시	2.5초 초과시	104% 초과시	10초 초과시	110~120%	1분 초과시
부족전압	87% 미만시	2.5초 초과시	92% 미만시	10초 초과시	80~90%	1분 초과시
임펄스	100V피크 초과시	0.5μs ~ 2ms	-	-	-	-
과도전압	-	-	-	-	-	-
써지	106% 초과시	0.5~180 사이클	190% 초과시	-	-	-
차단	10% 미만시	0.25 사이클 초과시	10% 미만시	10초 초과시	10% 미만시	1분 초과시
Waveform Fault	-	-	15% tolerance	1ms~100ms	8%tolerance	0.5ms~100ms

표 3 NPL 조사 데이터

	기간	1~6	6~10	10~20	20~30	0.5~1	1~2	2~10	10초	총발생횟수 (회/년)
	크기	사이클	사이클	사이클	사이클	초	초	초	~8시간	
5분필터 를 갖지 않는 경우의 데이터	110% 초과	1.38	0.25	0.45	0.17	0.08	0.15	0.07	0.4	2.9
	106~110%	3.48	1.40	2.17	1.54	3.79	6.35	18.16	127.6	164.5
	80~87%	64.0	39.3	49.3	21.1	22.7	15.2	72.0	7.9	291.5
	70~80%	19.0	4.8	2.4	0.9	0.6	0.4	0.1	0.0	28.4
	50~70%	5.6	2.3	0.9	0.6	0.6	0.3	0.1	0.0	10.5
	10~50%	2.3	1.2	0.6	0.4	0.5	0.1	0.2	0.1	5.60
	0~10%	0.3	0.3	0.8	0.9	1.4	1.9	4.2	5.7	15.42
	총발생횟수 (회/년)	91.3	48.0	54.0	24.0	25.9	17.9	76.6	13.6	351.4
5분필터 를 갖는 경우의 데이터	110% 초과	1.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	1.8
	106~110%	2.7	0.8	1.4	1.0	2.0	2.5	7.6	89.2	107.1
	80~87%	48.5	13.6	6.3	2.3	2.7	1.6	5.6	0.9	81.6
	70~80%	15.3	3.9	1.4	0.4	0.4	0.2	0.1	0.0	21.7
	50~70%	4.0	1.7	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1	0.0	7.3
	10~50%	1.6	0.9	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	3.7
	0~10%	0.2	0.3	0.7	0.8	1.2	1.5	3.3	4.2	12.1
	총발생횟수 (회/년)	69.6	20.4	9.4	4.0	4.9	3.6	9.	5.2	126.4

표 4 CEA 조사 데이터

	기간	1~6	6~10	10~20	20~30	0.5~1	1~2	2~10	10초	총발생횟수 (회/년)
	크기	사이클	사이클	사이클	사이클	초	초	초	~8시간	
변압기 2차측 측정 데이터 (필터를 갖지 않는 경우)	110% 초과	0.6	0.0	1.9	0.3	0.4	0.2	0.1	-	3.6
	106~110%	161.0	0.0	152.4	27.1	83.7	39.9	70.0	-	534.1
	80~87%	4.0	0.0	13.0	3.0	26.2	28.3	4.3	-	78.8
	70~80%	1.3	0.0	2.4	0.3	0.7	0.1	0.0	-	4.8
	50~70%	1.7	0.0	1.0	0.2	0.7	0.2	0.1	-	3.8
	10~50%	3.3	0.0	0.3	0.0	0.2	0.1	0.1	-	4.1
	0~10%	3.7	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	2.1	-	6.5
	총발생횟수 (회/년)	14.1	0.1	16.6	3.5	27.9	29.2	6.6	-	98.1
변압기 1차측 측정 데이터 (필터를 갖지 않는 경우)	110% 초과	0.6	0.0	0.4	0.0	0.5	0.0	0.0	-	1.6
	106~110%	135.2	0.0	49.2	5.1	17.9	12.3	40.4	-	260.2
	80~87%	2.9	0.0	3.1	0.2	1.1	0.4	0.6	-	8.3
	70~80%	0.4	0.1	0.9	0.0	1.0	0.2	0.0	-	2.6
	50~70%	2.2	0.3	1.2	0.1	0.8	0.0	0.0	-	4.5
	10~50%	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	1.7
	0~10%	1.9	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.7	-	3.2
	총발생횟수 (회/년)	9.1	0.4	5.3	0.3	3.2	0.6	1.4	-	20.3

표 5 EPRI 조사 데이터

변전소 측정 데이터 (5분 필터를 갖는 경우)	기간	1~6	6~10	10~20	20~30	0.5~1	1~2	2~10	10초	총발생횟수 (회/년)
	크기	사이클	사이클	사이클	사이클	초	초	초	~8시간	
	80~90%	28.3	6.1	3.0	1.3	1.9	0.6	0.4	0.1	41.7
	70~80%	8.1	2.6	1.2	0.4	0.4	0.1	0.2	0.0	13.1
	50~70%	5.0	1.5	1.0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.0	8.3
	10~50%	1.1	0.4	0.4	0.1	0.1	0.0	0.4	0.0	2.5
	0~10%	0.2	0.1	0.4	0.8	0.5	0.9	1.1	1.4	5.4
	총발생횟수 (회/년)	42.7	10.7	6.0	2.8	3.2	1.8	2.3	1.5	71.0
급전선 측정 데이터 (5분 필터를 갖는 경우)	80~90%	27.6	6.5	3.1	1.4	1.8	0.5	0.4	0.1	41.4
	70~80%	8.1	2.2	1.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.0	12.5
	50~70%	5.7	1.7	1.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.0	9.4
	10~50%	3.5	1.0	0.7	0.3	0.2	0.2	0.6	0.0	6.5
	0~10%	1.6	0.1	0.2	0.6	0.5	1.1	2.3	1.7	8.1
	총발생횟수 (회/년)	46.5	11.5	6.2	2.8	3.3	2.1	3.7	1.9	77.9

조사장소의 약 10[%]는 상용전원의 전력품질 특성을 조사하기 위해 상용 변압기의 1차측에서 측정되었다.

■ EPRI 조사 :

미국내 주된 배전계통의 전력품질을 조사하기 위한 목적으로 1993년 6월과 1995년 9월 사이에 EPRI에 의해 수행되었으며 모니터링은 변전소와 4.16~34.5[kV]의 급전선에서 이루어 졌다. 277개소에서 5691 monitor months의 데이터를 획득하였으며, 대부분의 경우에 있어서 3개의 모니터가 하나는 변전소에 나머지 두 개는 급전선을 따라 무작위로 선택된 장소에 설치되었다.

이외에도 EFI(Norwegian Electric Power Research Institute, 최근“SINTEF Energy Research”로 개칭)가 EFI 조사를 통하여 노르웨이의 400개소 이상에서 전압강하는 물론 기타 전압 외란을 측정하였다.

표 2는 NPL, CEA, EPRI 각 조사 기관의 조사에서 전압 변동의 크기와 그 발생기간에 기초를 두어 각기 나름대로 정의한 전압장애의 유형을 보이고 있다. 여기서 제시되어 있는 전압변동의 유형은 각 조사기관 마다 다르고 표 1에 정의 되어있는 전압변동의 범주와도 다소 차이가 있다.

표 3~5는 이 세 개의 전력품질 조사를 통해 1년당 기록된 사고의 횟수를 보여주고 있다. 표에서 5분 필터(5-min filter)는 주어진 모니터링 장소에서 임의의 5분 동안 취득한 전압변동의 데이터 중에서 전압변동의 크기가 가장 큰 하나의 데이터만을 취하는 것을 말한다. 따라서 5분 필터를 사용하여 사고 발생 수를 기록하는 경우에는 필터를 갖

지 않는 경우에 비하여 사고의 발생수가 줄어든 것으로 나타나게 된다. 즉 NPL에 의한 사고건수 데이터를 나타내는 표 3에 있어 5분 필터를 갖는 경우의 총 사고 발생건수는 필터를 갖지 않는 경우에 비하여 60[%] 정도 감소되고 있음을 알 수 있는데 이는 필터를 갖지 않는 경우 주어진 5분 간격 안에 둘 또는 그 이상의 사고가 발생된 것으로 처리되고 있음을 의미한다. 이러한 현상이 발생하는 이유의 한가지 예로서 고장 발생시 재폐로기(recloser)가 여러번 동작되는 현상을 들 수 있다.

표 4는 CEA의 조사결과로서 각각 필터를 갖지 않고 변압기의 2차측과 1차측에서 측정된 사고 건수를 나타내며 표 5는 EPRI의 조사결과를 나타내는 것으로 각각 5분 필터를 갖고 변전소와 급전선에서 측정된 데이터의 수를 보여주고 있다.

표 3~5로부터 전압의 크기가 작아지는 전압변동의 대부분은 80[%]~90[%]의 범위에서 가장 많이 나타남을 알 수 있으며 전압의 크기가 더욱 큰 폭으로 작아지는 전압변동일 수록 그 발생 빈도는 더욱 적어지는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한 이러한 전압변동은 변전소나 배전시스템의 급전선에서 보다는 최종 사용자 측에서 더욱 많이 발생되고 있음을 알 수 있다.

5. 전압 변동의 대책

5.1 단기간 전압변동의 대책

전압변동의 영향을 줄이기 위한 대책은 전원공급자, 장치제

작자 및 전원사용자들에 의해서 각각 달리 이루어 질 수 있는데 일반적으로 부하 입력단에 가까운 전압레벨에서의 대책일 수록 비용이 적게 든다. 전압변동 대처 방안으로 철공진 변압기(ferroresonant transformer), UPS(uninterruptible power supply) 시스템 그리고 자기적 파형합성기(magnetic synthesizer) 및 전동-발전세트(motor-generator set)와 같이 전압조정장치를 사용하는 방법이 존재하고 또한 전동기 기동 전류의 억제를 위한 여러 가지 기동법의 사용이나 선로 피뢰기의 설치 등과 같이 상용전력 시스템 상에서 전압변동 발생 원인을 사전에 방지하기 위한 일련의 조치들이 존재한다.^(1~2)

5.1.1 전압조정장치의 사용을 통한 대책

(1) 철공진 변압기

철공진 변압기는 정전압 변압기(constant-voltage transformer: CVT)라 불리기도 하며 대부분의 전압강하 상태를 다룰 수 있다. 철공진 변압기는 기본적으로 포화곡선 이상의 영역에서 여자되는 1:1 변압기이다. 따라서 입력전압 변화에 그다지 영향을 받지 않는 출력을 나타내게 되어 일정한 전압을 공급할 수 있게되는데 전형적인 철공진 변압기의 회로는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 철공진 변압기는 특히 출력측에 미리 조정된 회로 때문에 가변하지 않고 소비전력이 낮은 부하에 적용하는 것이 적합하다.

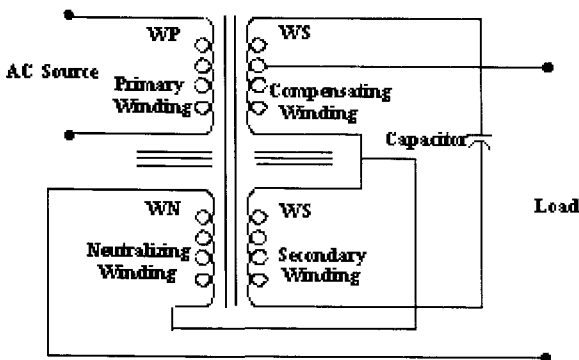


그림 5 철공진 정전압변압기

(2) 자기적 파형합성기

자기적 파형합성기는 입력전력의 품질에 상관없이 3상 입력전력을 취하여 깨끗한 3상 교류 출력 파형을 발생시키는 전자기적 장치이다. 이러한 일련의 과정을 보여주는 블럭선도는 그림 6에 나타낸 바와 같다. 비선형 초크 코일을 사용하여 입력전력의 에너지 변환과 선로의 절연이 이루어지도록 하며 이를 통해 선로 노이즈 문제 역시 제거되도록 한다. 교류 출력파형은 포화필스변압기로부터 얻어지는 전압펄스들을 결합하여 생성하는데, 전류 및 전압 형태로 각각 포화변압기와 커

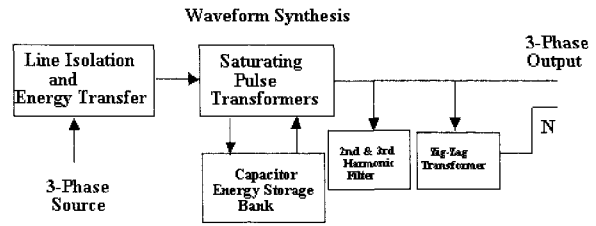


그림 6 자기적 파형발생기의 블럭선도

패시터 뱅크에 축적되어 있는 에너지는 최종적으로 지그재그 변압기를 통해 3상 출력된다.

자기적 파형발생기는 일반적으로 큰 부하를 대상으로 사용되는데 비용면에서 효과적인 장치가 되도록 하기 위해 부하는 몇 kVA정도의 용량은 되어야 한다. 일반적으로 자기적 파형발생기는 대형 컴퓨터나 전압 품질에 민감한 전자장비들에 사용되고 있다.

(3) UPS

① on-line형

그림 7(a)는 전형적인 on-line UPS의 구조를 나타내고 있으며 부하는 항상 UPS를 통해 전력을 공급받는다. 유입되는 교류는 직류로 정류되어 배터리를 충전시키게 되며, 직류 전력이 교류 부하에 공급되기 위해 다시 인버터를 사용하게 된다. 만약 전원측의 유입 교류전력이 일시적으로 상실된다면 인버터가 배터리의 에너지를 이용하여 부하에 전력을 계속 공급한다. on-line UPS는 정전뿐만 아니라 모든 전력선의 외란으로부터 부하 보호에 매우 유용하나 가격이 비싸고 손실이 많은 단점이 있다.

② standby형

standby형 UPS는 외란이 발생될 때까지는 정상적인 전원 전력이 부하에 공급되고 외란 발생시 그림 7(b)와 같이 절환 스위치를 통하여 배터리가 연결되어 있는 인버터로 부하를 절환하기 때문에 off-line UPS라 하기도 한다. standby형 UPS는 외란 발생시 전원에서 인버터 시스템으로 빠른 절환이 일어나도록 동작시키는 일이 중요하다.

③ hybrid형

hybrid형 UPS는 그림 7(c)와 같이 standby UPS의 동작 중 전원에서 UPS로 절환 되는 순간 부하에 전압레플레이션을 수행하도록 하기 위해 UPS 출력단에 앞에서 설명한 철공진 변압기를 함께 사용한 경우에 해당한다.

(4) 전동-발전세트

전동-발전세트는 전원의 전압변동에 대처하기 위하여 전동기와 발전기의 기계적 결합과 그 관성에너지를 이용한 것으로 이는 매우 다양한 크기와 구조를 지니고 있다. 전동-발전

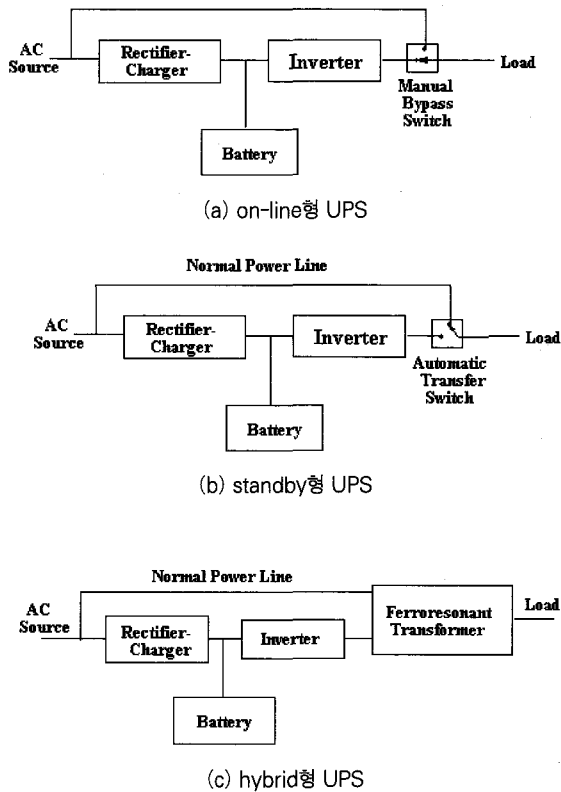


그림 7 UPS의 유형

세트는 일정 60[Hz]의 주파수를 만들어 낼 수 있는 전동기 구동 동기발전기를 생각할 수 있으며 일정 출력의 공급은 회전자 자극의 극성을 연속적으로 변화시킴으로써 가능하고 전 원측 전력이 끊어진 경우 부하에 대한 연속적 전력의 공급은 관성에너지를 이용하여 얻게 된다.

5.1.2 전압변동 발생 원인의 방지를 통한 대책

전동기는 기동시 전부하 전류의 몇 배에 달하는 기동전류를 발생시켜 전력시스템에 순시적인 전압강하를 발생시키게 된다. 이로 인한 전압강하 현상은 조명을 흐리게 하거나, 전자 접촉기를 오동작 하도록 하는 등 전력품질에 민감한 부하에 좋지 않은 영향을 주게 된다. 정격속도로 전동기를 가속시키는데 필요한 시간은 전압강하의 크기와 함께 비례하여 증가하며, 과도한 전압강하는 전동기의 기동을 아예 저해할 수도 있다. 따라서 단권변압기형 기동기(autotransformer starter), 저항 및 리액턴스 기동기(resistance and reactance starter), 부분권선 기동기(part-winding starter), 델타-와이 기동기(Δ -Y starter) 등을 이용하여 전 동기 기동시 기동전류를 줄여주기 위한 여러 가지 방법이 사용되고 있다.

아울러 상용 전원시스템에서 고장을 사전에 배제 시킴으로써 전원 사용자의 만족을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 전력 시스템에 발생하는 비용적 손해를 미연에 방지할 수 있게되는데 이를 위한 일련의 활동으로 tree trimming, insulator washing, 선로 피뢰기의설치, 동물 방호물 설치 등을 들 수 있다. 또한 선로 재폐로기(line recloser)등을 추가 배치하거나 개선시키고 급전선의 설계 변경등을 통해 순간정전 및 전압강하의 수와 기간을 줄일 수 있다.

5.2 장기간 전압변동의 대책

일반적으로 상용전원은 최종 사용자에게 공급되는 전압의 크기가 정상전압의 $\pm 5\%$ 이내로 유지되도록 하고 있으며 짧은 시간 동안 긴급한 조건이 발생한 경우에 대해서 ANSI Standard C84.1은 상용전원의 공급전압이 정상전압의 $+6\% \sim -13\%$ 범위 안에 드는 것을 허용하고 있다.

대부분의 전압조정 문제를 발생시키는 근본적인 원인은 전력 시스템 내에 임피던스가 너무 크기 때문인 것으로 볼 수 있는데 전압조정을 향상시키기 위한 선택으로 다음과 같은 사항들을 들 수 있다.

- ① 전압 조정기 추가로 부하공급 전압의 상승유도
- ② 선로전류 감소를 위한 병렬 커패시터 추가 및 전압 전류의 동 위상화 조절
- ③ 유도성 임피던스 강하 상쇄를 위한 직렬 커패 시터 추가
- ④ 선로 임피던스 감소를 위해 선로의 도체 단면 증대 및 사용 변압기의 사이즈 증대
- ⑤ 빠르게 변화하는 부하 대응을 위한 정지형 무효전력보상기 추가

뿐만 아니라 상용전원과 산업현장의 전력 시스템에서 사용되는 전압조정 장치들에는 여러 가지 종류가 존재하며 이러한 장치들은 대략 다음의 3가지로 분류될 수 있다.

- 첫 번째로 탭변환을 이용하는 변압기를 들 수 있으며 이에는 기계적 것과 전자적인 것이 존재한다. 기계적인 탭변환 변압기는 동작이 느린 반면 전자적인 장치들은 전압변화에 매우 재빠르게 반응할 수 있다. SCR 또는 트라이악을 사용하는 탭 전압조정기는 전압 조정을 위해 철공진 변압기보다 효율적이고 빠른 탭 변환을 수행할 수 있으며 중용량 부하에 많이 응용되고 있다. 그림 8은 전자적인 탭 스위칭 전압조정기의 구조를 보이고 있다.

- 둘째로 단기간 전압변동의 대책을 위해 사용되는 UPS 시스템, 철공진 변압기, 전동-발전세트 등이 장기간 전압변동의 대책을 위해서도 사용된다. 이러한 장치는 본래 몇 가지 형태의 에너지 변환을 수행하게 되고 전원에 어떠한 형태의 전압변동이 발생하더라도 부하에 일정한 전압이 유지되도록 전압 조정을 수행할 수 있다.

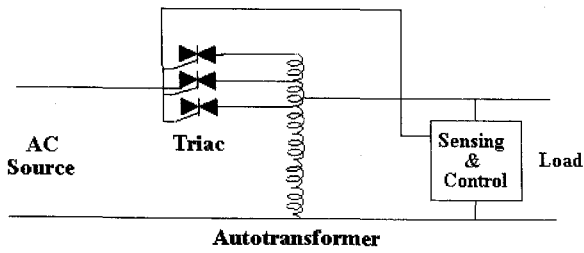
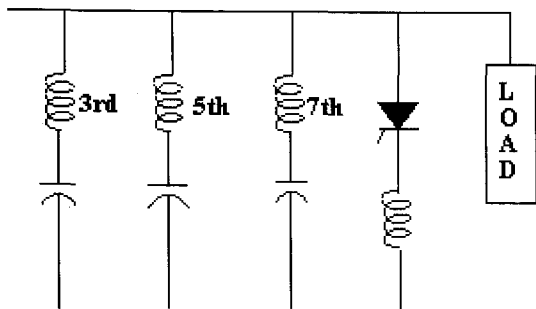
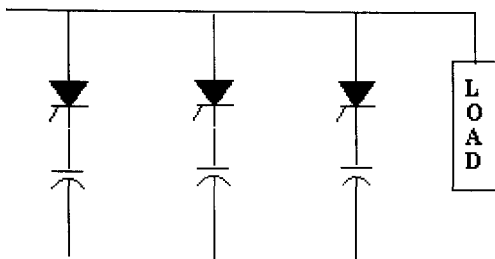


그림 8. 트라이액 탭 전압조정기



(a) Thyristor-Switched Reactor



(b) Thyristor-Switched Capacitor

그림 9 정지형 무효전력보상기의 유형

- 셋째로 병렬 커패시터는 선로전류를 줄임으로써 일정한 전압을 유지시키는데 도움을 주며 유도성 회로를 과보상함으로써 전압상승이 이루어 지도록 할 수 있다. 또한 유도성 임피던스 강하를 위해 직렬 커패시터를 사용할 수 있으며 이는 과도한 플리커를 발생시키는 급변하는 부하에 잘 적용된다. 플리커를 발생시키는 부하에 대한 또 하나의 접근 방법은 정지형 무효전력보상기(static var compensator)를 적용하는 것인데 이는 무효전력 제어를 수행함으로써 몇 주 기 이내에 일정한 전압을 유지시키도록 동작할 수 있다.

그림 9에서와 같이 보통 무효전력보상기에는 두 가지의 중요한 형태가 존재하는데 이중 TCR(thyristor-controlled

reactor)방식이 가장 많이 사용되고 있다. 이는 커패시턴스 효과의 전부 또는 일부를 상쇄시키기 위한 thyristor-controlled 인덕터와 진상의 무효전력을 제공하기 위한 고정 커패시터 뱅크로 구성된다. thyristor-switched capacitor는 가능한 근접하게 부하 요구조건을 만족하도록 커패시터의 단계 스위칭을 수행함으로써 동작된다.

6. 맺는말

컴퓨터 및 마이크로프로세서를 사용하는 전자장비 등 전력 품질에 민감한 장치들이 대거 등장하고 사용이 크게 늘어나면서 전력품질에 관한 관심이 더욱 높아지게 되었다. 전력품질에 직접적 관련이 되는 전압변동 현상은 그 전압변동의 크기와 지속시간에 따라 여러 가지 범주로 분류될 수 있는데 여기에서는 각각의 범주에 대한 배전계통에서의 전압변동의 원인과 그 대책방안에 관하여 주로 기술하였다.

외국의 경우 전압변동의 데이터를 얻기 위한 대규모의 전력 품질조사가 이미 이루어져 보고되었으며 이러한 조사를 통하여 조사지역의 전압변동 특성을 파악할 수 있는 중요한 자료로 활용되고 있다. 국내에서도 국내 사정에 맞는 고품질의 전력공급을 위해 다각적인 노력이 조속히 이루어 져야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, Electrical power systems quality, McGraw-Hill, 1996.
- [2] Mark F. McGranaghan, et al., "Voltage sags in industrial systems", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, No. 2, pp.397-402, March/April 1992.
- [3] R.F. Woll, "Effect of unbalanced voltage on the operation of polyphase induction motors," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.IA-11, No.1, pp.38-42, 1975.
- [4] A.Campos, et al., "Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching function," IEEE Trans. on Power Electronics, vol.9, No. 3, pp.269-274, May 1994.
- [5] Vijay B. Bhavaraju, et al., "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, No.2, pp.287-292, 1996.

- [6] A. Kneschke, "Control of utility system unbalance caused by single phase electric traction," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.21, pp.1559-1570, Nov./Dec. 1985.
- [7] Douglas S. Dorr, et.al., "Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 33. No. 6. pp.1480-1487, Nov./Dec. 1997.
- [8] Math H. J. Bollen, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, IEEE Press.

〈 저 자 소 개 〉



이승요(李承約)

1967년 7월 16일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 졸업(공박). 현재 건국대 전력전자기술연구소 연구원.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 1998년~1999년 미국 버지니아주립대 교환교수. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 1982년~현재 건국대 공대 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구소 소장. 당 학회 총무이사.