

전력품질의 이해 및 전력장애에 따른 보호 기술 ①

(주)태경전기산업 김병상 대표이사



목 차

I. 전력품질(Power Quality)의 이해

1. Power Quality의 정의
2. Power Quality저하 배경
3. Power Quality저하 징후
4. Power Quality관리 지표

II. 전력장애(Disturbance)의 분류

1. 주파수 변동
2. 전압 변동
3. 파형의 왜곡
4. 전압 불평형

III. 전력장애(Disturbance)의 원인

1. 번개(Lighting)
2. 부하의 개폐(Load Switching)
3. 전력망(Power Network)
4. 접지(Grounding)
5. 기타

I. Power Quality의 이해

기존의 전력 품질에 대한 개념은 대부분의 전력 기기들이 진공관식이거나 Coil Type의 장비들로써 절연이 비교적 높아 별 악영향없이 사용되었으므로 그다지 어려운 문제가 발생하지 않았다.

그러나, 반도체 기기는 더욱 빨라지고 소형화되어 그 절연또한 매우 미세해져서 전력품질 문제에 더욱 취약해 졌다.

간혹, 이러한 정밀기기의 오작동으로 인해 제조사와 사용자간의 분쟁이 발생되기도 한다. 이는 전력 계통에 존재 할 수 밖에 없는 전력장애에 의한 것으로 전력장애가 왜 발생되는지, 어떻게 이러한 전력장애를 피할 수 있는지 살펴본다.

1. Power Quality의 정의

Power Quality란 전기설비에 공급되는 전력의 상태로서, 부하가 일을 하는데 영향을 주는 전기적인 SYSTEM과 공급 전압의 특성이다.

즉, Power Quality를 이해하기 위한 기본적인 전제조건이 공급 전압이 변동 된다면 부하는 어떻게 영향을 받는지 또, 부하 특성은 어떻게 변화되는지 알아야하는 것이다.

따라서, 입력전압이 부하에 어떻게 영향을 미치



는지 알아보자.

- 조명등과 입력전압과의 관계
- 유도 전동기와 입력전압과의 관계
- 히터와 입력전압과의 관계
- 전자식 제어기구와 입력전압과의 관계

① 조명등과 입력전압과의 관계

자료 출처 : 전기설비 기술계산 핸드북 [2.6 전압 변동]

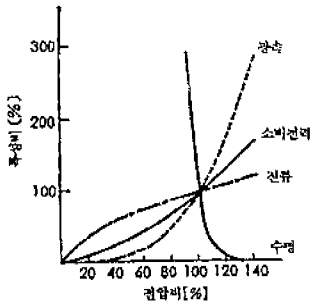


그림1 백열전구의 전압변동특성(예)

백열전구는 전압이 변화하면 필라멘트의 온도가 변화한다. 전압이 -10[%]일 때, 광속은 -30[%]가 되고 30[%]의 효율저하가 발생한다. 또한, 전압이 +10[%]가 되면 수명이 약 1/3으로 줄어들어 교환비가 비싸진다.

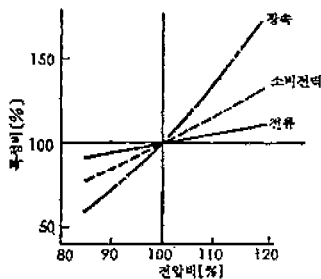


그림2 할로겐전구의 전압변동특성(예)

백열전구, 형광램프, 수은램프 등 각종 램프의 기본성능이라 할 수 있는 밝기, 수명은 모두다 램프의 사용전압, 즉 조명기구로의 입력전압에 의해 크게 좌우되는 성질을 갖고 있다.

형광램프는 안정기에 따라서도 다르지만, 전압이 높을 때는 램프전류가 증가하여 전극의 흑화가 촉

진되기 때문에 수명이 줄어든다, 또한, 전압이 지나치게 낮으면 시동이 어려워지고, 전극물질의 조기비산등이 일어나 수명이 줄어든다. 일반적으로 전압변동범위는 정격전압의 ±6[%]이내로하는 것이 권장되고 있다.

수은등은 형광등과 거의 같은 전압특성을 가지고 있고, 전압변동범위로서는 ±6[%]가 권장되고 있다.

② 유도 전동기와 입력 전압과의 관계

자료 출처 : IEEE std 241-1990 [3.5 Effect of Voltage Variation]

Characteristic	Function of Voltage	Voltage Variation	
		90% Voltage	110% Voltage
Starting and maximum running torque	(Voltage) ²	Decrease 19%	Increase 21%
Synchronous speed	Constant	No change	No change
Percent slip	1/(Voltage) ²	Increase 25%	Decrease 17%
Full-load speed	Synchronous speed-slip	Decrease 1.6%	Increase 1%
Efficiency	—	Decrease 2%	Increase 0.5 to 1%
Full load % load	—	Precisely no change	Precisely no change
1/4 load	—	Increase 1 to 2%	Decrease 1 to 2%
Power factor	—	Decrease 1%	Decrease 2%
Full load % load	—	Increase 2 to 3%	Decrease 4%
1/4 load	—	Increase 4 to 6%	Decrease 5 to 6%
Full-load current	—	Increase 11%	Decrease 7%
Starting current	Voltage	Decrease 10 to 12%	Increase 10 to 12%
Temperature rise, full load	—	Increase 9 to 7°C	Decrease 1 to 2°C
Maximum overload capacity	(Voltage) ²	Decrease 19%	Increase 21%
Magnetic noise - no load in particular	—	Decrease slightly	Increase slightly

[표 : 1]

[표 : 1]에서 알 수 있듯이 유도 전동기에서는 부하율에 따라서 최고 효율점이 변화됨을 알 수 있다.

공급전압은 정격 전압에 가까운 것이 바람직 하지만 변압기, 전동기 등은 철손 등의 관계로 경부하 상태에서는 공급전압이 정격전압보다 낮은 것이 효율적이고, 중부하 상태에서는 반대로 공급전압이 높은 것이 효율적이다.

그러나, 중부하에서는 부하 전류에 비례하여 공급 전압은 저하한다. 따라서, 가장 효율적인 SYSTEM을 유지하기 위해서는 전압강하를 가능한 적게할 필요가 있다.

③ 히터와 입력전압과의 관계

전압의 제공에 비례하여 열출력이 변화되며, 전압이 높으면 수명은 저하된다.

④ 전자식 제어기구(전자접촉기, 솔레노이드 등)

전자접촉기 등의 제어기구는 +10~-15(%)범위에서 지장없이 동작하도록 설계되어 있으나, 전

압이 높아지면 여자전류가 늘고, 또한 자속밀도의 증가로 온도 상승이 커져서 수명이 단축된다. 일반적으로 전압이 10(%) 높으면 기계적 수명은 약1/2이 된다고 한다.

2. Power Quality의 저하 배경

① 부하전압의 변동증가

사무실의 쾌적한 환경을 위해 더 많은 공조기가 필요하게 되었고, 생산량의 증가에 따라 제조 Line등에서는 더욱 많은 Motor가 추가 되었다. 이러한 부하의 증가에 기인하여 사용전류는 더욱 많아지고, 이로 인해 부하에 공급되는 전압의 변화는 더욱 심각해졌다. 많은 에너지가 필요한 컴프레셔등의 투입은 공급 전압을 순간적으로 감소시키며, 이로 인해 부하의 전동기는 운전 Speed가 떨어지거나 멈추게 되는 현상이 발생되었고, 심한 전압 변동에 기인하여 조명등에서는 Flicker현상이 나타나기도 한다. 또한, 매우 민감한 전자 장비들은 또 다른 이유와 장비의 민감도에 따라 Malfunction이 발생된다.

② 고조파 부하의 증가

과거의 부하는 Linear(선형) 부하-유도전동기, Heating, 진공관 등-로 이루어 졌으며, 단지 전류의 크기만으로써 전압이 변동되었다. 이러한 정현파 상태에서는 매우 적은 문제만이 발생되었다. 산업 기술의 발달로 non-linear(비선형)부하-컴퓨터, ups, 정류기, 인버터등-가 매우 증가되었다. 이 비선형 부하는 비정현파 전류를 발생시키게 되는데, 이 비선형 전류는 정현파와는 다른 왜곡된 전류로써 정현파 부하를 기초로 설계된 전력망에 또다른 영향을 끼치는 고조파 부하라고 부른다. 고조파 부하를 사용함으로써 발생하는 이 고조파 전류는 동일한 정현파 전류를 선로에서 사용하는 경우보다 훨씬 많은 전압 강하를 일으키게 한다. 부하의 전기적인 특성에서 알 수 있듯이 전압변동에 대하여 어느정도 면역성(immunity)을 갖고 있다. 그러나, 어떠한 이유에서든 공급되는 전압의 변동이 심해진다면, 정상적인 작동에서도 더욱 많은 에너지가 소모되며, 트러블의 가능성도 증가하게 될 것이다.

3. Power Quality저하 징후

사람이나 동물도 병에 걸리게 되면 여러가지 나쁜 증상이 나타나게 되는데 병을 치료하는 의사는 이러한 증상을 잘 관찰하여 병의 원인과 치유법을 발견하게 된다.

전력망에서도, 마찬가지이다.

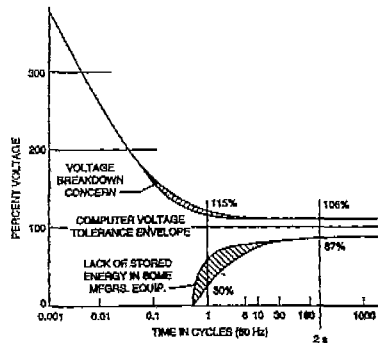
전력품질이 나빠지게 된다면, 여러가지 나쁜 징후들이 나타나게된다. 이러한 징후는 계통의 전력품질이 나빠졌음을 알려주는 신호라고 볼수 있으며, 이때에는 전력 품질을 개선할 필요가 있다.

<여러가지 징후의 예 >

- Circuit breakers(부하차단기)가 과부하 없이 trip 이 된다
- 변압기의 소음이 더욱 커진다.
- 낙뢰가 있는 동안에 전력장비에서 문제가 발생된다.
- 자동화된 제어 System이 어떠한이유없이 정지한다.
- 전력배전반, Cable등이 진동, 떨림 현상이 심하다.
- 전자 System이 자주 오동작을 하거나 실패한다.
- 전자 System이 위치가 바뀌면 제대로 동작되지 않는다.
- System이 자주 재부팅을 요구한다.
- 조명램프가 침침하거나 깜박거린다.
- 조명램프를 자주 교체한다.
- 중성선 Cable에 발열현상이 심하다.
- MOTOR의 기능이 약해진다.
- 예기치 못한 전기요금 증가가 있다.

4. Power Quality 관리자표

① CBEMA CURVE



[그림 3 Typical Design Goals of Power-Conscious Computer Manufacturers]

[자료 출처 : IEEE std 1100-1992]



[그림 3]은 미국의 컴퓨터 설비 제조 연합[Computer Business Manufacturers Association : CBEMA]에 의해서 제안되었으며 초기에는 컴퓨터의 전압 왜란에 대한 면역성(Immunity)을 나타내는 수단으로 이용되었고, 현재는 전압변동에 대한 설비 영향 분석을 위해서 가장 많이 이용되고 있는 Graph이다.

[CBEMA CURVE]에서 알수 있듯이 긴시간대의 Constant 영역에서는 최대 허용과 전압을 +6%, 최대 전압강하는 -13%까지 허용한다. 짧은 순시영역 시간대에서는 전압의 크기 허용은 시간에 반비례 함수로 정의함을 알 수 있다.

② 전자장비의 면역성 (Immunity of Electronic loads)

Matching Sensitive Load and Power Source Requirements With Expected Environments

Voltage Parameter Affecting Loads	Typical Range of Power Sources	Typical Immunity of Electronic Loads		
		Normal	Critical	Units affected and comments
Over and Undervoltage	+6%, -13.3%	+10%, -15% ± 5%		Power supplies, capacitors, motors. Component overheating and data upset.
Swells/Sags	+10%, -15%	+20%, -30% ± 5%		Same as above.
Transients, Impulsive & Oscillatory, Power Lines	Varies: 100-6000 V	Varies: 500-1500 V	Varies: 200-500 V	Dielectric breakdown, voltage overstress. Component failure and data upset.
Transients, Impulsive & Oscillatory, Signal Lines	Varies: 100-6000 V	Varies: 50-300 V	15-50 V	Same as above.
ESD	<45 kV 1000-1500 V	Varies widely 200-500 V	Varies widely 15-50 V	Signal circuits. Dielectric breakdown, voltage overstress. Component failure, data upset. Rapid changes in signal reference voltage.
RF/EMI (Conducted) (normal and common mode)	10 V up to 200 kHz less at higher freq.	Varies widely 3 V typical	Varies widely 0.3 V typical	Signal circuits. Data upset, rapid changes in signal reference voltage.
RF/EMI (Radiated)	<50 kV/m, <200 kHz <1.5 kV/m, >200 kHz	Varies widely w/ shielding	Varies widely w/ shielding	Same as above.
Voltage Distortion (from sine wave)	5-60% THD	5-10%	3-5%	Voltage regulators, signal circuits, capacitor filters, capacitor banks. Overheating, under-charging.
Phase Imbalance	2-10%	5% max	3% max	Polyphase rectifiers, motors. Overheating.
Current Parameter Affecting Sources	Typical Range of Load Current	Typical Susceptibility of Power Sources		
Power Factor	0.85-0.8 lagging	0.8 lagging	<0.8 lagging or <0.9 leading	Power source derating or greater capacity source with reduced overall efficiency.
Crest Factor	1.4-2.5	1.0-2.5	>2.5	1.414 normal; impact function of impedances at 3rd and higher harmonics (3-5% Z). Voltage shape distortion.
Current Distortion	0-10% total rms	5-10% total 0-5% largest	5% max total 3% largest	Regulators, power circuits. Overheating.
DC Current	Negligible to 5% or more	< 1%	As low as 0.5%	Half-wave rectifier loads can saturate some power sources, trip circuit breakers.
Ground Current	0-10 A rms + noise and surge currents	>0.5 A	<0.1 A	Can trip GFI devices, violate code, cause rapid signal reference voltage changes.
Frequency Parameter Affecting Loads	Typical Range of Power Sources	Typical Immunity of Electronic Loads		
Line Frequency	± 1%	± 1%	± 0.5%	Zero-crossing counters.
Rate of Freq. Change	1.5 Hz/s	1.5 Hz/s	0.3 Hz/s	Phase synchronization circuits.

Source: Based on FIPS PUB 94 [11]

[표 : 2]

[자료 출처 : IEEE std 110-1992]

[표2]에서 알 수 있듯이 민감한 전자 장비에 필요한 전력품질 환경에 대한 지침으로 Constant 영역에서의 전압변동, 순시전압변동, Noise, 전압 왜형에 대한 한계를 정의하고 있다.

II. 전력장애(Disturbance)의 분류

대부분의 전력장비는 정상적인 운전을 위해서 필요한 적정 전압을 요구하게 된다.

운전 전압에 따라 전력 장비는 그 능력을 제한 받게 된다.

전력 장비는 정격 전압을 초과해서 견디는 능력이 한정되어 있고 어느 level 이하인 경우에는 정상적인 운전을 수행할 수 없게 된다.

전력장애의 주요 원인은 정상적인 전압 한도 이상을 초과하거나 부족할때 장애가 발생하는데 이러한 장애 요소를 다음의 4가지 Parameter로 분류할 수 있다.

- Frequency Variations (주파수 변동)
- Voltage Variations (전압 변동)
- Waveform Variations (파형 왜곡)
- Dissymmetry (전압 불평형)

1. 주파수 변동

주파수 변동은 주로 발전기등에서 전원을 공급 받을 때, 부하의 급변동에 기인할 수 있으며 Malfunction의 원인이 된다.

2. 전압 변동

전압 변동은 부하의 변동에 기인하는데, 특히 무효 전력과 고조파 부하가 많은 경우 더욱 심하게 된다. 전압 변동은 부하 설비의 효율, 출력, 속도, 수명 등에 크게 영향을 미치게 된다.

예를 통해서 전압 변동의 차이를 살펴보자

- ① 일반적인 저역률 부하에서의 전압 변동률
- ② 고조파 부하에서의 전압변동률

① 일반적인 저 역률 부하에서의 전압 변동률

● 역률 개선전 전압 변동률

부하조건

변압기에서의 최대 부하율 : 75%
 변압기 2차측에서의 역률 : 75%
 개별 부하의 역률 : 75%

* 배전변압기 용량 : 3상380V 1000KVA
 * 변압기 임피던스 : %Z=6% (R=0.8%, %X = 5.95%)
 * 배전선로의 조건 : 600V CV 250mm² × 2Feeder로 가정
 CV Cable 선로 정수 = (0.0972 + j0.117) × 1/2 × 300/1000
 = 0.0164 + j0.0176 [Ω]

a) 변압기에서의 전압 변동률

$$\Delta V = p \cos \theta + q \sin \theta$$

$$= \frac{750}{1000} \times (0.8 \times 0.75 + 5.95 \times \sqrt{1 - 0.75^2}) = 3.4\%$$



변압기에서는
 -3.4%의
 전압 변동이 발생된다.

b) 부하선로에서의 전압 변동률

부하사용조건 : 부하사용 용량 : 3상380V 300KVA, 사용전류 : 456A

$$\Delta V = I(R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$= 456 \times (0.0146 \times 0.0176 + 0.0176 \times \sqrt{1 - 0.75^2}) = 10.3(V)$$



배전선로에서는
 -4.7%의
 전압 변동이 발생된다.

$$\Delta V(\%) = \frac{10.3V}{220V} \times 100(\%) = 4.7(\%)$$

부하에서의 최대 전압 변동률 = 변압기에서의 전압강하 + 부하선로에서의 전압강하 = 3.4% + 4.7% = 8.1%

● 역률 개선후 전압 변동률

부하조건

변압기에서의 최대 부하율 : 75% × 역률 개선율 [0.75/0.95 × 100(%) = 78.9(%)]
 변압기 2차측에서의 역률 : 95%

개별 부하의 역률 : 95%

a) 변압기에서의 전압 변동률

$$\Delta V = p \cos \theta + q \sin \theta$$

$$= \frac{750}{1000} \times 0.789 \times (0.8 \times 0.95 + 5.95 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) = 1.5\%$$



변압기에서는
 -1.5%의
 전압 변동이 발생된다.

b) 부하선로에서의 전압 변동률

부하사용조건 : 부하사용 용량 (3상380V 300KVA), 사용전류 (456A)
 역률 개선율과 비례한 부하전류 감소율 (0.75/0.95 = 0.789)

$$\Delta V = I(R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$= 456 \times 0.789 \times (0.0146 \times 0.95 + 0.0176 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) = 7.0(V)$$



배전선로에서는
 -3.2%의
 전압 변동이 발생 된다.

$$\Delta V(\%) = \frac{7.0V}{220V} \times 100(\%) = 3.2(\%)$$

부하에서의 최대 전압 변동률 = 변압기에서의 전압강하 + 부하선로에서의 전압강하 = 1.5% + 3.2% = 4.7%

계산결과에서 알 수 있듯이, 역률 개선후에는 전압 변동률이 3.4% 감소됨을 알 수 있다.

다음호에 계속됩니다