



전력품질의 이해 및 전력장애에 따른 보호 기술 ②

(주)태경전기산업 김병상 대표이사



목 차

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

② 고조파 부하에서의 전압 변동률

- 역률 개선전 전압 변동률

부하 조건

1000kVA 변압기에서의 최대 부하율: 75%

변압기 2차측에서의 역률: 60%

개별 고조파 부하의 역률: 40%

3상 정류방식의 일반적인 측정 부하 전류 기준시
고조파 함유율(30%~40%)

$$I_1=100\%, I_3=30\%, I_7=10\%, I_n=\text{기타 생략}$$

$$I_T = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_7^2 + \dots} = \sqrt{1^2 + 0.3^2 + 0.1^2} = 1.05xI_1$$

= 총 전류의 합은 1.05배

a) 변압기에서의 전압 변동률

$$\Delta V = p \cos \theta + q \sin \theta = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots}$$

$$\Delta V_1 = 0.75x(0.8x0.6 + 5.95x\sqrt{1-0.6^2})x\frac{1}{1.05} = 3.7(\%)$$

$$\Delta V_2 = 0.75x(0.8x0.6 + 5.95x5x\sqrt{1-0.6^2})x\frac{0.3}{1.05} = 5.2(\%)$$

$$\Delta V_3 = 0.75x(0.8x0.6 + 5.95x7x\sqrt{1-0.6^2})x\frac{0.1}{1.05} = 2.4(\%)$$

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots} = \sqrt{3.7^2 + 5.2^2 + 2.4^2} = 6.8(\%)$$

변압기에서는 최대 부하율(75%)에서 -6.8%전압 변동률이 발생 된다.

b) 부하 선로에서의 전압 변동률

부하조건

부하 사용 용량 : 300kVA, 역률 : 40%
 3상 정류방식의 일반적인 측정 부하 전류 기준시 고조파 함유율 (30%~40%)
 $I_1=100\%$, $I_3=30\%$, $I_5=10\%$, I_n =기타 생략
 $I_t = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} = \sqrt{1^2 + 0.3^2 + 0.1^2} = 1.05xI_1$
 = 총 전류의 합은 정현파 전류의 1.05배

$$\Delta V = I(R \cos \theta + X \sin \theta) = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots}$$

$$\Delta V_1 = 0.456x(0.0114x0.4 + 0.0116x\sqrt{1-0.4^2})x\frac{1}{1.05} = 6.6(\%)$$

$$\Delta V_2 = 0.456x(0.0114x0.4 + 0.0116x5x\sqrt{1-0.4^2})x\frac{0.3}{1.05} = 7.5(\%)$$

$$\Delta V_3 = 0.456x(0.0114x0.4 + 0.0116x5x\sqrt{1-0.4^2})x\frac{0.1}{1.05} = 3.4(\%)$$

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots} = \sqrt{6.6^2 + 7.5^2 + 3.4^2} = 10.6(\%)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{10.6V}{220V} \times 100(\%) \approx 4.8(\%)$$

배선선로에서는 최대 부하에서 -4.8%의 전압 변동이 발생 된다.

부하에서의 최대 전압 변동률 = 변압기에서의 전압강하 + 부하선로에서의 전압강하 = 6.8% + 4.8% = 11.6%

● 역률 개선후 전압 변동률

부하조건

1000kVA 변압기에서의 최대 부하율 : 75% × 역률 개선율 [0.6/0.95 × 100(%)=63.2(%)]
 변압기 2차측에서의 역률 : 95%
 개별 고조파 부하의 역률 : 95%



DeTuned Filter 사용후 고조파 함유율(20%이하)

$$I_1=100\%, I_2=20\%, I_3=5\%, I_n=\text{기타 생략}$$

$$I_r = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{1^2 + 0.2^2 + 0.05^2} = 1.022I_1$$

총 전류의 합은 1.02배

a) 변압기에서의 전압 변동률

$$\Delta V = p \cos \theta + q \sin \theta = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots}$$

$$\Delta V_1 = 0.75 \times 0.63 \times (0.8 \times 0.95 + 5.95 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{1}{1.02} = 1.2(\%)$$

$$\Delta V_2 = 0.75 \times 0.63 \times (0.8 \times 0.95 + 5.95 \times 5 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{0.2}{1.02} = 0.9(\%)$$

$$\Delta V_3 = 0.75 \times 0.63 \times (0.8 \times 0.95 + 5.95 \times 7 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{0.05}{1.02} = 0.6(\%)$$

$$\Delta V = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots} = \sqrt{1.2^2 + 0.9^2 + 0.6^2} = 1.7(\%)$$

변압기에서는 동일 조건 부하에서 -1.7% 전압 변동률이 발생 된다.

b) 부하 선로에서의 전압 변동률

부하조건

부하 사용 용량 : 300kVA, 역률 : 40%~95%로 개선(부하전류 감소율 = 0.4/0.95 = 0.42)
 deTuned Filter를 사용후 고조파 함유율 (20%)
 $I_1=100\%, I_2=20\%, I_3=5\%, I_n=\text{기타 생략}$
 $I_r = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{1^2 + 0.2^2 + 0.05^2} = 1.022I_1$
 = 총 전류의 합은 1.02배

$$\Delta V = I(R \cos \theta + X \sin \theta) = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots}$$

$$\Delta V_1 = 0.456 \times 0.42 \times (0.0114 \times 0.95 + 0.0116 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{1}{1.02} = 2.7(\%)$$

$$\Delta V_2 = 0.456 \times 0.42 \times (0.0114 \times 0.95 + 0.0116 \times 5 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{0.2}{1.02} = 1.1(\%)$$

$$\Delta V_3 = 0.456 \times 0.42 \times (0.0114 \times 0.95 + 0.0116 \times 7 \times \sqrt{1 - 0.95^2}) \times \frac{0.05}{1.02} = 0.3(\%)$$

$$\Delta V_r = \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \Delta V_3^2 + \dots} = \sqrt{2.7^2 + 1.1^2 + 0.3^2} = 2.9(\%)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{2.9V}{220V} \times 100(\%) = 1.3(\%)$$

배전선로에서는 최대 부하에서 -1.3%의 전압 변동이 발생 된다.

부하에서의 최대 전압 변동률 = 변압기에서의 전압강하 + 부하선로에서의 전압강하 = 1.7% + 1.3% = 3%

상기의 계산 결과에서 알수 있듯이, 저 역률 상태에서는 부하의 변화에 따라 전압 변동이 매우 커짐을 알 수 있다. 특히, 저역률 고조파 부하에서의 전압 변동률은 매우 치명적이라 할 수 있다. 많은 현장에서 이를 해결하기 위해 변압기의 TAP을 조정하기도 한다. 그러나 TAP을 조정하여 전압 강하분 만큼 전압을 상승시키게 될 때 전압 저하에 의한 Trip현상은 감소시킬수 있을지라도 에너지의 낭비는 말 할것도 없고 제품의 수명 또한 현저히 저하됨을 인지하여야 할 것이다.

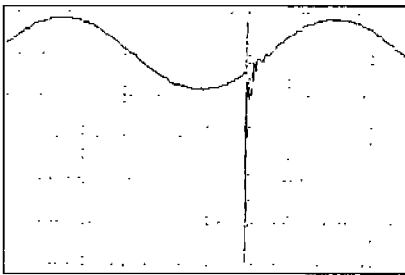
즉, 전력관리를 함에 있어서 올바른 역률 관리의 중요성을 다시한번 강조하고 싶다.

3. 파형의 왜곡

파형이 왜곡되는 것은 전력 계통의 어떤 현상에 의해 전력장애가 발생하는 경우이다. 파형의 왜곡 현상을 올바르게 이해함으로써 전력장애의 원인과, 올바른 해결책을 발견 할 수 있을 것이다.

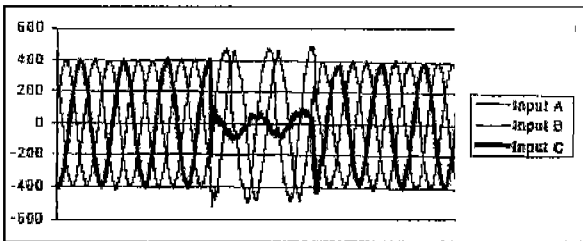
1) Transient surge

transient surge는 spike 혹은 impulse라고도 불리우며 순간적(보통 밀리초이내)으로 매우 높은 과전압이 발생하는 것을 말한다.



[그림4 유도뢰에의해서 발생된 surge 파형]

2) SAG or DIP



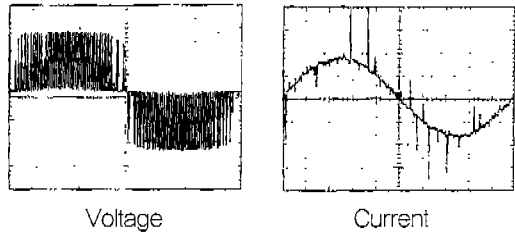
[그림5 C상 지락에 의해서 발생된 Sag 파형]

SAG란 전압의 크기가 0.9pu에서 0.1pu정도로 전압이 저하되는 현상으로써 0.5 cycle에서 수초 이내의 기간동안 지속되는 현상을 말한다.

3) SWELL

SWELL은 전압의 크기가 1.1pu에서 1.8pu 정도 되는 순간 전압 상승 현상으로써 지긋시간이 0.5cycle에서 수초이내의 기간동안 지속되는 현상을 말한다.

4) NOISE



Noise란 매우 높은 신호 주파수(10kHz~수십 MHz)영역의 잡음 신호가 동반되는 현상을 말한다.

5) Flicker

플리커 현상은 전압 변동에 의해 램프나 TV화면이 떨어지는 현상을 감지하는 데서 유래가 되었다.

이 플리커 현상은 정상적인 전압 범위인 0.9pu~1.1pu의 전압 변화내에 있으나 인간의 눈의 민감도 측면에서는 6Hz~8Hz 범위에서 0.5%의 전압 변동에서도 램프 플리커 현상을 인지 할 수 있다. 이러한 플리커 현상은 급변하는 대용량 부하의 가동시 발생 될 수 있으며 컴퓨터와 정밀 부하에 악영향을 미치게 된다.

6) Harmonics(고조파)

고조파는 전기적인 오염현상으로써 대부분 모든 전기계통에 영향을 미치고 있다.

고조파로 인해 왜곡된 파형은 프리에 급수 이론을 통해 기본파와 고조파의 합으로 분류할 수 있다.

고조파의 유해 정도를 판단하기 위해 다음의 기술적 지표가 이용된다.

1) Total Harmonic Distortion

$$I_{thd} = \frac{I_h(\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2})}{I_1} \times 100[\%]$$

정현파에대한 고조파 총량의 비율이며 그 정도에 따라 부하에 미치는 영향이 증가한다.

2) Crest Factor

정현파 첨두값 (1.41)에 대한 측정 파형 첨두값의 비로써 Crest factor가 높은 경우에는 부하에 미치는 영향이 증가한다.



3) K-Factor

- 부하에 고조파 전류가 포함된 경우에는 변압기에 같은 양의 정현파 전류가 흐르는 경우보다 더 높은 열이 발생된다.

이는 고조파에 의한 것으로 부하 손실중 Eddy Current Loss가 증가한 이유때문이다. 1986년 IEEE/ANSI C57, 110에서는 고조파 전류로 인해서 변압기가 과열되는 것을 방지하기 위해 사용중인 부하 전류에서 각 차수별 고조파 전류의 함유량을 측정하여 변압기 최대 허용 용량을 결정(저감)하는 Harmonic loss factor 를 규정하였다.

1994년 UL 1562 에서는 K-factor (Harmonic loss factor)에 대한 정의 및 시험에 대한 방법을 규정함으로써 힘수별 고조파 함유량에 따라 권선의 Eddy Current loss증가에서도 변압기가 과열 소손되는 것으로 방지토록 하였다.

즉, K-factor는 고조파로 인해 온도가 상승되는 factor를 의미하는 것으로 이해 할 수 있다.

- 아래에 계산 예를 살펴보자

Mold 변압기의 조건

용량 : 3상 22.9kV / 3800220V 1,000kVA
 효율 : 98.6% (KSC 4301 기준)
 무부하손실 : 4.41kw
 부하손실 : 9.79kw
 총 손실 : 14.20kw

- 고조파 측정치에 따른 Harmonic Loss Factor의 계산

h	I_{hD}	$(I_h/I_1) \times 100$	$(I_h/I_1)^2$	(W_h/W)	$(W_h/W)^2$	I^2	$(W_h/I^2) \times I^2$	비고
1	100.00	100.00	1.000	0.95	0.9	1	0.9	
2	0.27	0.27	0.000	0.00	0.0	4	0.0	
3	1.77	1.77	0.000	0.02	0.0	9	0.0	
4	0.25	0.25	0.000	0.00	0.0	16	0.0	
5	27.69	27.69	0.077	0.26	0.1	25	1.7	
6	0.32	0.32	0.000	0.00	0.0	36	0.0	
7	16.35	16.35	0.027	0.15	0.0	49	1.2	
8	0.16	0.16	0.000	0.00	0.0	64	0.0	
9	0.20	0.20	0.000	0.00	0.0	81	0.0	
10	0.04	0.04	0.000	0.00	0.0	100	0.0	
11	7.95	7.95	0.006	0.08	0.0	121	0.7	
12	0.11	0.11	0.000	0.00	0.0	144	0.0	
13	7.03	7.03	0.005	0.07	0.0	169	0.7	

h	I_{hD}	$(I_h/I_1) \times 100$	$(I_h/I_1)^2$	(W_h/W)	$(W_h/W)^2$	I^2	$(W_h/I^2) \times I^2$	비고
14	0.04	0.04	0.000	0.00	0.0	169	0.0	
15	0.32	0.32	0.000	0.00	0.0	225	0.0	
16	0.06	0.06	0.000	0.00	0.0	256	0.0	
17	4.85	4.85	0.002	0.05	0.0	289	0.6	
18	0.09	0.09	0.000	0.00	0.0	324	0.0	
19	0.81	0.81	0.000	0.01	0.0	361	0.0	
20	0.04	0.04	0.000	0.00	0.0	400	0.0	
21	0.34	0.34	0.000	0.00	0.0	441	0.0	
22	0.04	0.04	0.000	0.00	0.0	484	0.0	
23	1.44	1.44	0.000	0.01	0.0	529	0.1	
24	0.09	0.09	0.000	0.00	0.0	576	0.0	
25	0.51	0.51	0.000	0.00	0.0	625	0.0	
계	34.31	1.06	1.057	1.62	1.0		6.0	

상기표는 OC현장의 실측 고조파 전류의 data 값을 이용하여 K-factor(Harmonic loss factor)를 계산하였다.

IEEE PC57.110의 계산근거를 통하여 계산되었으며, 계산결과에 따라 FHL(Harmonic loss factor)는 6.0으로 계산되었다.

- Other Stray Loss Factor의 계산 생략

- Harmonic Loss Factor의한 실제 변압기 손실

구분	Rated Loss	(W_h/I^2)	load loss(%)	FHL	정정손실
I^2R loss	85.0	1.057	89.9		89.9
Eddy loss	15.0	1.057	15.9	6.0	94.6
Stray loss	생략				
T - loss	100.0		105.7		184.5

고조파전류와 정현파전류의 제곱비(1.057)의 값이 뜻하는 것은 고조파로 인한 I^2R 손실이 5.7% 증가한 것을 뜻하는데 실효치(RMS)값은 5.7%정도가 증가되었으나 Eddy loss의 값은 5.7%만 증가되는 것이 아니라 Harmonic Loss Factor 증가 값을 곱한 수치만큼 증가한다.

결론적으로 Harmonic loss Factor가 6일때 총 손실은 정격 손실보다 약 85%가 증가된다.

(Eddy loss의 비율은 I^2R loss의 15%로 가정함) 이러한 손실 증가는 일반적으로 변압기에서 견딜수 있는 수준을 초과한다.

즉 일반 변압기로서는 이러한 고조파손실에 대응하기 위해서는 약 2배정도 크게 용량을 Over Sizing해야한다.

결론적으로 변압기손실 뿐만 아니라 모든 전력

부품을 크게 하여야 하는 엄청난 비효율이 발생된다. 따라서, 고조파 부하에서는 K-rate변압기를 채택하는 것이 매우 합당하다.

4. 전압 불평형

전압 불평형은 삼상 전압의 평균치에 대한 최대 편차값의 비율로 정의된다.

$$\text{unbalance} = \frac{\text{max-min}}{\text{avg}} \times 100(\%)$$

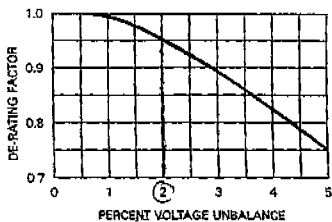
이 불평형 전압은

- 단상부하의 심한 편중이나
- 무효전력/고조파 전력의 증가
- 접촉불량 등으로 발생된다.

전압 불평형은 삼상 평형 부하(대부분의 전동기)의 혼을 저하에 매우 큰 영향을 미친다.

종종 이러한 전압 불평형이 전동기의 과열과 소음을 증가시켜 수명을 단축하는 것을 경험한다.

[자료출처 : IEE std 241-1990 3.11.3 Effect of Voltage Unbalance]



NOTE: See also MG1-14.26 of ANSI/NEMA MG1-1978, Motors and Generators (1987 Edition) [4] for more complete information about the de-rating factor.

De-Rating Factor for Motors Operating with Phase Voltage Unbalance

[그림4]

[그림4]에서 알수 있듯이

전압 불평형이 2%로 공급되는 경우 유도 전동기에서는 약 5%의 출력 감소가 발생 되는데, 이 출력 감소 원인은 불평형 전류를 증가시키고 역 토크를 발생시켜 진동과 과열이 발생되기 때문이다. 전압 불평형에 대한 규격상의 규정을 살펴보면

NEMA 규격 : 전동기 단자에서의 전압 불평형은 1%이하를 권장

IEC 규격 : 전동기 단자에서의 전압 불평형은 2% 이하를 권장하고 있다.

II. 전력 장애의 원인

전력장애는 현장에서 불규칙하며 예기치 못하게 발생되고, 또 어떤 장애는 장비의 운전 에 관련되어 예견되기도 하고 반복되기도 한다.

이러한, 전력장애의 원인을 정확히 이해하는 것만 이 올바른 치료법을 찾을 수 있다.

1. 번개(Lightning)

■ 구름에서 땅으로의 번개와 땅에서 구름으로의 번개로 인한 피해는 상상을 초월한다. 부품의 손상 및 회로판의 손실, 심지어 화재 등이 “직접 타격”의 결과이다. 이와 같은 피해는 주로 폭풍우 동안에 발생하며 피해를 통제하거나 예방할 수 있는 방법이 매우 희박하기 때문에 “신의 행동”이라고 이름 붙인다. 피뢰기(Lightning Arrester)는 Arrester가 파괴되지 않는다면 그 시설내의 전선이나 케이블의 피해를 최소화 시킬수 있다. 그러나 피뢰기 자체만으로 시설 내 전자장비를 보호할 수는 없을 것이다.

■ 구름간 번개이동으로 인한 장비 피해를 규정하기란 더욱 어렵다. 구름간 이동은 전광처럼 보이거나 “열 번개(Heat Lightning)” 처럼 보일 것이다. 어느 경우는 그 발생 Surge가 대파국의 수준이 될 것이다. 연구에 따르면 이러한 번개는 그 사정거리 1마일 내에 있는 금속도체 안에 미터당 70V까지의 과전류압 수준을 발생시킬 수 있다. 미터당 70V는 1Km의 선로에서는 70,000V에 해당되는 Transient Voltage Surge를 발생시키게 된다.

■ 또한, 매우높은 과도 전압이 유기되는 경우에는 선로와 대지간에 flash over(섬락)가 발생되기도 하는데 이러한 섬락으로 수 Cycle동안 순시 전압저하(sag)현상이 발생되기도 한다.

다음호에 계속됩니다