

고조파 전류에 의한 변압기 온도상승

김낙응 / 건축전기설비기술사
문병주 / 건축전기설비기술사

1. 개요

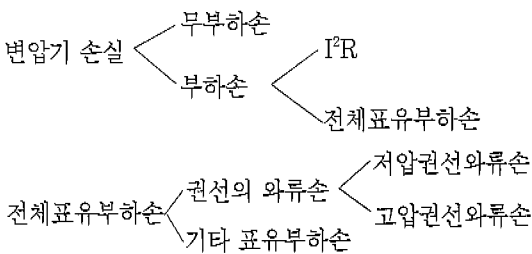
각종 건축물, 전기철도, 산업현장에서 인버터, 정류기, UPS 등의 부하로 인하여 변압기에 고조파 전류가 흐르는 경우 변압기의 온도상승에 어떤 영향을 미치는지 IEEE Std C57.110-1998(ANSI Std C57.110-1998)의 규격이 개정되었다.

상기 규격의 요지는 고조파 전류가 흐르면 누설자속이 고조파의 영향을 받고, 이 고조파 자속에 의해 권선의 와류손과 기타 표유 부하손이 증가하여 변압기의 온도상승을 초래하므로 사용중인 변압기는 용량을 감소하여 운전하여야 한다.

건식변압기(몰드변압기포함)와 유입 변압기가 운전되고 있다고 가정하고 이에 대한 예를 들어 설명하기로 한다.

2. 기본사항

변압기의 손실은 다음과 같이 분류한다.



권선의 와류손은 누설자속이 권선을 쇄교하면서 발생하는 손실로 저압권선와류손과 고압권선와류손으로 나뉘어지며, 기타 표유부하손은 누

설자속이 외함(유입변압기의 경우 탱크, 건식변압기의 경우 큐비클), 클램프, 철심표면을 쇄교하면서 발생하는 손실이다.

2.1 와류손

- 1) 권선의 와류손 = $0.67 \times$ 전체표유부하손 (건식변압기의 경우)
- 2) 권선의 와류손 = $0.33 \times$ 전체표유부하손 (유입변압기의 경우)

2.2 권선의 와류손 분류

- 1) 저압권선와류손이 60%, 고압권선와류손이 40%
- 2) 단, 변압기의 권수비가 4:1보다 크고, 저압 권선의 자냉식 전류용량이 1000A보다 큰 경우는 저압권선와류손이 70%, 고압권선와류손이 30%이다.

2.3 권선의 와류손 특성

각 권선의 와류손 분포는 권선의 분포에 대하여 일정하지 않으며, 권선의 온도상승이 가장 높게 일어나는 곳(hottest spot)의 와류손 밀도는 그 권선의 평균 와류손 밀도의 400% 정도이다.

3상 변압기의 전체 표유부하손은 다음과 같다.

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} (\text{고압 } I^2R + \text{저압 } I^2R) \text{ (watt)}$$

2.1에 의하여

$$P_{EC-R} = 0.67 \times P_{TSL-R} \text{ (watt)} \text{ (건식 변압기의 경우)}$$

$$P_{RC-R} = 0.33 \times P_{TSL-R} \text{ (watt)} \text{ (유입변압기의 경우)}$$

또 변압기 손실 분류에 의하여

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{RC-R} \text{ (watt)}$$

2.2에 의하여 저압 권선(안쪽에 있는 권선)의 와류손은 $0.6 P_{EC-R}$ 혹은 $0.7 P_{EC-R}$ 이다.

또 2.3에 의하여 최대 와류손 밀도는 평균 와류손 밀도의 400%이므로 3상 변압기의 저압권선 와류손을 저압권선의 I^2R 에 대하여 표시하면

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{2.4 \times P_{EC-R}}{3 \times (I_{2-R})^2 \times R_2} \quad (pu) \text{ 이거나}$$

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{2.8 \times P_{EC-R}}{3 \times (I_{2-R})^2 \times R_2} \quad (pu) \text{ 이거나}$$

고압 권선(바깥에 있는 권선)의 와류손도 같은 방법에 의하여 표시될 수 있다.

유입변압기의 경우 IEEE Std C57.110-1998의 (식21)에 의하여 권선 내부에서 온도가 제일 높은 곳(hottest spot)의 온도상승은 다음과 같다.

$$\theta_{E1} = \theta_{E1-R} \times ((1 + 2.4 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)) / (1 + 2.4 P_{EC-R}(pu)))^{0.8} \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ 이거나}$$

$$\theta_{E1} = \theta_{E1-R} \times ((1 + 2.8 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)) / (1 + 2.8 P_{EC-R}(pu)))^{0.8} \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ 이 된다.}$$

3. 건식 변압기(몰드 변압기 포함)

3.1 사양

1) 정격사항

3상, 1000kVA, 22.9kV/380-220V, Delta/Wye, 자냉식, 1차 정격 상전류(I_{1-R})=14.56A, 2차 정격 상전류(I_{2-R}) = 1519A

2) 상세특성

| 항 목 | 수 치 | 비 고 |
|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 효율 | 99.0% | |
| 무부하손실(P_{NL}) | 3030Watt | |
| 부하손실(P_{LL-R}) | 7575Watt | |
| R_1 | 6.047ohm | 고압1상에 대한 저항값 |
| R_2 | 0.000371ohm | 고압1상에 대한 저항값 |
| 권수비 | 104:1 | $= 22900 / 380 / \sqrt{3}$ |
| $(I_{1-R})^2 R_1$ | 1282Watt | |
| $(I_{2-R})^2 R_2$ | 856Watt | |
| P_{TSL-R} | 1161Watt | $= 7575 - 3 \times (1282 + 856)$ |
| P_{EC-R} | 778Watt | $= 0.67 \times 1161$ |
| Max. P_{EC-R} | 0.848 | $= 2.8 \times 778 / (3 \times 856)$ |

3.2 고조파 전류

변압기 2차측에 흐르는 전류는 다음과 같다.

| | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| I_h/I_1 | 1.00 | 0.04 | 0.092 | 0.022 | 0.412 | 0.018 | 0.199 |
| h | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| I_h/I_1 | 0.010 | 0.018 | 0.015 | 0.046 | 0.010 | 0.048 | |

* 기본파(60Hz) 전류를 1.00으로 하였을 때 고조파 전류의 비율임.

| h | I_h/I_1 | $(I_h/I_1)^2$ | h^2 | $(I_h/I_1)^2 h^2$ |
|----|-----------|---------------|-------|-------------------|
| 1 | 1.000 | 1.000 | 1 | 1.000 |
| 2 | 0.044 | 0.00194 | 4 | 0.00776 |
| 3 | 0.092 | 0.00846 | 9 | 0.07614 |
| 4 | 0.022 | 0.00048 | 16 | 0.00765 |
| 5 | 0.412 | 0.16974 | 25 | 4.24350 |
| 6 | 0.018 | 0.00032 | 36 | 0.01152 |
| 7 | 0.199 | 0.03960 | 49 | 1.9404 |
| 8 | 0.010 | 0.00010 | 64 | 0.0064 |
| 9 | 0.018 | 0.00032 | 81 | 0.02592 |
| 10 | 0.015 | 0.00023 | 100 | 0.02300 |
| 11 | 0.046 | 0.00212 | 121 | 0.25652 |
| 12 | 0.010 | 0.00010 | 144 | 0.01440 |
| 13 | 0.048 | 0.00230 | 169 | 0.38870 |
| 합계 | - | 1.226 | - | 8.002 |

3.3 정격 전류의 변화

표의 3째줄에 의하여 부하전류의 PMS 값, 즉 $I(pu)$ 는 1.107이다.

$$I = \sqrt{1.226} = 1.107(pu)$$

IEEE Std C57.110-1998의 (식16)에 의하여 비정현파 부하 전류에 의해 권선 내부중 와류손이 가장 큰 영역에서의 국부 손실밀도(local loss density)는 다음과 같다.

$$F_{HI} = \frac{\sum (I_h / I_1)^2 h^2}{\sum (I_h / I_1)^2} \\ = 8.002 / 1.226 \\ = 6.528$$

$$P_{LL}(pu) = I(pu)^2 \times (1 + F_{HI} \times P_{EC-R}(pu)) \quad (pu) \\ = 1.226 \times (1 + 6.528 \times 0.848) \quad (pu) \\ = 8.013(pu)$$

비정현파 허용 최대 전류의 RMS 값은 IEEE Std C57.110-1998의 (식17)에 의하여 다음과 같다.

$$I_{Max}(pu) = \left(\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)} \right)^{1/2}(pu)$$

이를 3.2에 의한 고조파 구성 비율을 갖는 저압권선에 적용하면

$$I_{Max}(pu) = \sqrt{\frac{1 + 0.848}{1 + 6.528 \times 0.848}}(pu) = 0.532(pu)$$

이를 RMS값으로 표현하면

$$I_{Max}(A) = 0.532 \times 1519 = 808A \text{가 된다.}$$

즉 일정 규모이상의 변압기에 있어서는 저압권선에서 고조파 누설자속에 의한 와류손의 증가로 국부 가열이 생기게 되고 이를 변압기 운전의 중요한 요소로 간주하는 경우 위와 같이 변압기 운전전류를 감소하여 운전하거나 적절한 고조파 제거 대책을 세운 후 운전하여야 한다.

4. 유입변압기

4.1 사양

1) 정격사항

3상, 2500kVA^{NL}, 22.9kV/380-220V, Delta / Wye, 자냉식, 1차 정격 상전류(I_{1-R}) = 36.39A, 2차 정격 상전류(I_{2-R}) = 3798 A

2) 상세특성

| 항 목 | 수 치 | 비 고 |
|---|--------------|-------------------------|
| 효율 | 99.1% | |
| 무부하손실(P _{NL}) | 3784Watt | |
| 부하손실(P _{LL-R}) | 18920Watt | |
| 권선온도 상승 | 55℃ | |
| 절연유 온도상승(상부) | 55℃ | |
| 권선 최고온도 상승 | 65℃ | Top oil rise |
| R ₁ | 2.252ohm | Hot spot conductor rise |
| R ₂ | 0.0001378ohm | 고압1상에 대한 저항값 |
| 권수비 | 104:1 | 저압1상에 대한 저항값 |
| (I _{1-R}) ² R ₁ | 2982Watt | =22900/ 380/√3 |
| (I _{2-R}) ² R ₂ | 1988Watt | 고압1상 |
| 전체표유부하손(P _{TSL-R}) | 4010Watt | 저압1상 |
| 권선의 와류손(P _{EC-R}) | 1323Watt | =4010×0.33, 고압 및 저압권선 |
| 기타표유부하손(P _{OSL-R}) | 2687Watt | =4010×0.67 |

4.2 고조파 전류

변압기 2차측에 흐르는 전류는 다음과 같다.

| h | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| I _h /I ₁ | 1.00 | 0.453 | 0.267 | 0.186 | 0.0915 |
| h | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 |
| I _h /I ₁ | 0.0712 | 0.0512 | 0.0425 | 0.0402 | 0.0387 |

※ 기본파(60Hz) 전류를 1.0으로 하였을 때 고조파 전류의 비율임.

| h | I _h /I ₁ | (I _h /I ₁) ² | h ² | (I _h /I ₁) ² h ² | h ^{0.8} | (I _h /I ₁) ² h ^{0.8} |
|----|--------------------------------|--|----------------|---|------------------|---|
| 1 | 1.00 | 1.000000 | 1 | 1.000000 | 1.000000 | 1.000000 |
| 3 | 0.453 | 0.205209 | 9 | 1.846881 | 2.408225 | 0.494189 |
| 5 | 0.267 | 0.071289 | 25 | 1.782225 | 3.623898 | 0.258344 |
| 7 | 0.186 | 0.034596 | 49 | 1.695204 | 4.743276 | 0.164098 |
| 9 | 0.0915 | 0.008372 | 81 | 0.678152 | 5.799546 | 0.048555 |
| 11 | 0.0712 | 0.005069 | 121 | 0.613402 | 6.809483 | 0.034520 |
| 13 | 0.0512 | 0.002621 | 169 | 0.443023 | 7.783137 | 0.020403 |
| 15 | 0.0425 | 0.001806 | 225 | 0.406406 | 8.727161 | 0.015763 |
| 17 | 0.0402 | 0.001616 | 289 | 0.467036 | 9.646264 | 0.015589 |
| 19 | 0.0387 | 0.001498 | 361 | 0.540666 | 10.54394 | 0.015792 |
| 합계 | - | 1.332077 | - | 9.472996 | - | 2.067254 |

표의 3째줄에 의하여 부하전류의 RMS 값 I(pu)는 1.15이다.

$$I = 1.332077 = 1.15(pu)$$

표의 5째줄에 의하여 권선의 와류손에 대한 고조파 손실 factor

F_{HL}은 7.11이다.

$$F_{HL} = 9.472996 / 1.332077 = 7.11$$

표의 7째줄에 의하여 기타 표유부하손에 대한 고조파 손실 factor

F_{HL}은 1.55이다.

$$F_{HL} = 2.067254 / 1.332077 = 1.55$$

지금 75% 부하(기본파 전류기준)에서 운전중 이라고 가정하고 고조파전류를 감안한 부하손실은 다음과 같다.

$$P_{LL}(pu) = 1.15^2 \times 0.75^2 = 0.744(pu)$$

| 구 분 | 정격손실 (watt) | 운전손실 (watt) | F _{HL} | 보정손실 (watt) |
|------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| 무부하손 | 3784 | 3784 | - | 3784 |
| I ² R | 14910 | 11093 | - | 11093 |
| 권선의 와류손 | 1323 | 984 | 7.11 | 6996 |
| 기타 표유부하손 | 2687 | 1999 | 1.55 | 3098 |
| 전체손실 | 22704 | 17860 | - | 24971 |

4.3 온도 상승

절연유 온도 상승(상부)은 IEEE Std C57.110-1998의 (식18)에 의하여 다음과 같다.

$$\theta_{70} = 55 \times \left(\frac{24971}{22704} \right)^{0.8} = 59.4^{\circ}\text{C}$$

저압 권선에 대한 손실은 다음과 같이 계산된다.
 $(I_{2-R})^2 \times R_2(3\text{상}) = 3 \times 1988 = 5964 \text{ watt}$
 $I_2^2 \times R_2(3\text{상}) = 5964 \times (1.15 \times 0.75)^2 = 4437 \text{ watt}$
 2.2의 2)에 의하여 변압기 권수비가 104:1이고 저압권선의 전류가 3798A이므로 저압권선 와류손이 70%, 고압권선 와류손이 30%이다.

또, 권선 최고 온도상승이 일어나는 곳의 최대 와류손은 평균 와류손의 4배이다.

따라서, IEEE Std C57.110-1998의(식20)과 (식21)에 의하여 절연유 온도상승(상부)에 대한 권선 최고 온도상승은 다음과 같이 계산된다

$$\theta_r = (65-55) \times \left(\frac{4437+6996 \times 2.8}{5964+1323 \times 2.8} \right)^{0.8}$$

$$= 10 \times \left(\frac{24026}{9668} \right)^{0.8}$$

$$= 20.7^{\circ}\text{C}$$

따라서 주위온도에 대한 권선 최고 온도상승은 다음과 같이 계산된다.

$$59.4 + 20.7 = 80.1^{\circ}\text{C}$$

이 경우에 있어서 고조파 전류를 포함한 RMS 전류는 정격 전류의 86%이나 권선 최고 온도상승은 80.1℃로 65℃를 15.1℃ 초과한다.

따라서 권선 최고 온도상승을 중요한 요소로 간주하는 경우 변압기 부하전류를 감소하여 운전하거나 적절한 고조파 제거대책을 세운후 운전하여야 한다.

5. 기호의 의미

F_{HL} : 권선 와류손 또는 기타 표유 부하손에 대한 고조파 손실 factor

(harmonic loss factor)

h : 고조파 차수

I : 부하 전류의 RMS 값(A)

I_1 : 고압 권선에 대한 기본 주파수(60Hz) RMS 전류(A)

I_{1-R} : 고압권선에 대한 기본 주파수(60Hz) 정격 상전류(A)

I_2 : 저압 권선에 대한 기본 주파수(60Hz) RMS 전류(A)

I_{2-R} : 저압 권선에 대한 기본 주파수(60Hz) 정격 상전류(A)

I_h : h고조파 RMS 전류(A)

P_{EC-R} : 정격에서의 권선의 와류손(watt)

P_{LL-R} : 정격에서의 부하손(watt)

P_{NL} : 무부하 손실(watt)

P_{OSL-R} : 정격에서의 기타 표유 부하손(watt)

P_{TSL-R} : 정격에서의 전체 표유 부하손(watt)

R_1 : 고압 권선(1상)의 저항값(ohm)

R_2 : 저압 권선(1상)의 저항값(ohm)

θ_g : 절연유 온도상승(상부)에 대한 권선 최고 온도 상승(℃)

θ_{g1} : 상부 절연유 온도에 대한 고압 권선의 최고점 온도 상승(℃)

θ_{g1-R} : 정격에서의 상부 절연유 온도에 대한 고압 권선의 최고점 온도 상승(℃)

θ_{70} : 상부 절연유 온도 상승(℃)

“나무에 가위질을 하는 것은 나무를 사랑하기 때문이다.

부모에게 꾸지람을 듣지 않고 자란 아이는 똑똑한 사람이 될 수 없다.

겨울에 추위가 심할수록 오는 봄의 나뭇잎은 한층 푸르다.

사람도 역경에 단련되지 않고서는 큰 인물이 될 수 없다.”

-B. 프랭클린

(미국의 정치가, 사상가, 과학자, 문필가, 1706~90)-