

전압 및 주파수 변동에 따른 콘덴서 열 분포 해석

(Analysis of Condenser Thermal Distribution
by the Variance of Voltage & Frequency)

김 종 검 · 박 영 진
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

요 약

콘덴서는 유도성 부하의 낮은 역률 보상으로 사용되며, 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터에 직렬로 연결하여 사용되기도 한다. 콘덴서는 전압이 증가할 경우 전류도 함께 증가하고, 주파수가 증가할 경우 콘덴서에 흐르는 전류가 증가하기 때문에 전류의 증가는 바로 열의 증가로 콘덴서 절연에 스트레스로 작용하여 고장의 원인을 제공할 수 있다. 본 연구에서는 콘덴서에 인가되는 전압의 크기와 주파수를 변화시킬 경우 콘덴서에서 발생하는 열을 열화상 카메라로 측정하여 외부 및 내부에서의 온도분포를 분석하였다. 측정결과 전압과 주파수가 증가할 경우 콘덴서에서 열이 매우 높게 분포함을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

전력용 커패시터는 무효전력의 제공, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템 전력 손실의 감소에 따른 시스템 용량의 증가를 가능하게 하므로 산업현장에서 널리 적용되고 있다. 이 전력용 커패시터는 주로 온도, 전류, 전압 등의 영향으로 정상적인 수명이 보장받지 못하고 절연파괴 등으로 소손되는 경우가 많다[1-3].

콘덴서 수명은 규정에 요구하는 사용 조건하에서 정상적으로 동작시킬 경우 수명은 15년 이상이 보장되지만, 절연열화를 촉진시키는 조건이 주어진 경우 수명은 매우 단축될 수 있다. 커패시터의 수명에 큰 영향을 주는 요소로서는 온도, 전압 그리고 전류 등이다. 전압의 증가시에 전류도 증가하게 된다. 특히 고조파를 줄이기 위해 수동형 필터로 콘덴서를 사용할 경우 공진점에서 고조파 전류를 대부분 흡수할 경우 전류는 매우 높아 콘덴서에 높은 열을 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 콘덴서에 인가되는 전압과 주파수의 변화시 콘덴서에서 발생하는 온도분포를 측정하였다.

2. 온도 및 전압에 의한 영향

콘덴서에 전기적인 스트레스로 절연을 열화를 일으키거나 파괴시키는 주요한 파라미터로서는 전압과 온도이다. 전압의 증가는 전류의 증가로 이어지며 전류의 증가는 바로 열을 증가시키게 된다.

전력용 커패시터는 무효전력의 제공, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터와 직렬 연결한 수동형 필터로도 사용된다.

전압이 증가할 경우 전류의 증가로 인해 열의 발생이 높아

진다. 이때 발생하는 온도의 영향은 식 (1)과 같이 아레니우스 법칙을 적용할 수 있다[4].

$$L = A \times e^{-n\theta} \quad (1)$$

여기서 A 와 n 은 유전체 자료의 특유한 정수이다. n 은 과전압 지수로서 실제로 유전체에 따라 차이가 나며 유침지의 경우 $n=7 \sim 8$ 이고, 필름은 $10 \sim 12$ 이다. 필름 콘덴서의 경우 전압을 1.2배로 올릴 경우 과전압 지수를 10이라고 할 경우 $(1.2)^{-10} = 0.16$ 으로서 수명은 1/6으로 줄어들게 된다.

수명이 반감되는 온도의 변화를 $\Delta\theta$ 라고 하면 온도 θ_0 에 있어 수명 L_0 와 온도 θ 에 있어 수명 L 사이는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{L}{L_0} = 2^{-\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}} \quad (2)$$

$\Delta\theta$ 값은 유전체 재료에 의해 약간의 차이는 있지만, 일반적으로 콘덴서의 경우는 $\Delta\theta = 7 \sim 8^\circ\text{C}$ 라고 생각한다.

이 수명과 온도의 관계를 보다 쉽게 하기 위해 온도가 어느 정도 상승(대략 10도 증가하면)한다고 하면 그 수명이 반으로 단축되는 값, 즉 수명반감에 해당하는 온도차가 일반적으로 이용되고 있다. 이때 식 (2)는 식 (3)과 같이 전압과 온도를 동시에 상승되는 경우에 적용되는 것으로서 주로 현장에서 이용할 수 있다.

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \times 2^{-\frac{\theta - \theta_0}{10}} \quad (3)$$

큐비클 안에 내장되는 고압콘덴서의 경우 온도가 높아지므로 정격전압을 높이고 있는데 이런 조건에서 식 (3)을 사용할 경우 6.6kV, 100kVA를 70°C 에 사용하던 것을 7.2kV로 변경하여 80°C 에 사용할 경우 과전압 지수 $n=10$ 인 경우 수명은 식 (3)에 대입할 경우 0.21로서 1/5로 축소된다.

위 관계식은 단순하게 전압만을 고려한 것이지만, 전력용 콘덴서에는 전압 상승에 수반하여 전압의 공급에 비례해서 kvar 용량이 증가하고, 이에 따라 발열량에 의해 온도가 높아지며 온도 요인이 증첩하기 때문에 상기 관계식에 의해 더욱 수명 단축하는 것으로서 전압의 영향은 더욱 커지게 된다.

또한 최근 대부분의 콘덴서에서는 그 유전체에 폴리프로필렌 필름이 사용되고 있는데, 절연유내에서 80~90℃를 초과하면 이 필름에 비정상적인 팽윤이 생겨 내전압이 저하되어 심하게 수명을 단축시키는 경우가 있다. 따라서 콘덴서 내부의 온도를 80℃ 이하로 유지 할 필요가 있다.

3. 전압 및 전류에 의한 영향

콘덴서의 용량은 식 (4)와 같이 전압 및 주파수로 표현할 수 있다. 콘덴서의 커패시턴스는 일정하기 때문에 용량을 변화시키는 요소로서는 주파수와 전압이다.

$$Q = 2\pi f CV^2 [VAR] \quad (4)$$

즉, 식 (4)에서 주파수가 일정한 경우 콘덴서에 인가되는 전압이 증가할 경우 용량의 전압의 공급에 비례하는 양만큼 증가하게 된다. 이때 콘덴서에 흐르는 전류는 식 (5)와 같이 주파수와 전압의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러나 주파수와 전압이 동시에 증가할 경우 용량의 더욱 증가하게 된다.

$$I_c = 2\pi f CV \quad (5)$$

위 식 (5)에서 콘덴서의 커패시턴스 값은 거의 변화가 없기 때문에 인가되는 전압과 주파수의 값에 따라 전류가 변화가 된다. 주파수가 일정한 경우 콘덴서에 인가되는 전압이 상승할 경우 콘덴서에 흐르는 전류는 전압의 증가만큼 증가하게 된다. 또한 콘덴서 인가되는 전압이 일정하더라도 주파수가 상승할 경우 전류 역시 상승한다. 전압과 주파수가 동시에 증가할 경우 콘덴서에 흐르는 전류는 공급에 해당하는 양만큼 전류가 증가하게 된다.

고조파 저감을 위해 콘덴서에 리액터를 직렬로 연결할 경우에도 전압이 상승하고, 병렬공진과 직렬공진 조건에서 콘덴서가 동작할 경우 각각 전압과 전류가 상대적으로 높아 전압 또는 전류의 증가로 인해 콘덴서는 더욱 많은 열적 스트레스를 받을 수 있다.

4. 온도 측정

전압 및 전류의 증가시 콘덴서에서 열의 발생이 평소보다 많아진다. 열의 발생에 따라 콘덴서에서 발생하는 열을 측정하기 위해 열화상 카메라를 사용하였다. 측정결과 정상적인 운전에서 내부에서 발생하는 열은 외부로 잘 전달되지 않아 전압 및 주파수 변화에 따른 온도 분포를 확인하기가 매우 어려웠다. 그래서 콘덴서를 개봉하여 내부 소자에 대해 직접 열화상 카메라로 측정하였다.

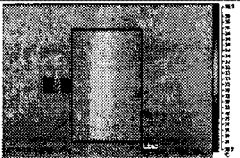
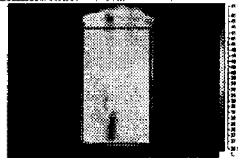
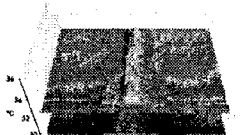

본 측정에 사용된 콘덴서는 저압설비용으로 380V 용 20μF 를 사용하였다. 저압 콘덴서의 경우 대부분 델타 결선으로 이루어져 있으며 명판에 표시된 커패시턴스의 값은 3 소자(엘리먼트)에 대한 합으로서 실제 상별 적용시는 3으로 나눈 값을 이용하면 된다.

콘덴서 구조에서는 3소자를 켄 안에 3단적으로 구성한 경우와 3소자를 병렬로 나란하게 배열한 경우도 있다. 이들 각각에서 외함과 내부에서의 온도 변화를 전압 및 주파수 변화에 따라 측정하였다.

콘덴서에 대해 발생하는 온도를 가장 일반적으로 측정할 경우 외함에서 발생하는 온도를 열화상 카메라로 측정한다. 이때 적외선 열화상 카메라를 이용할 경우 콘덴서의 외함에서 온도를 측정할 경우 반사에 의해 정확한 온도 측정이 매우 어렵다. 이럴 경우 반사를 줄일 수 있는 보조 수단을 이용해야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

다음 표 1은 정격전압에서 300Hz로 운전하는 콘덴서의 외부에서 발생하는 온도를 측정한 것이다. 표 1에서 상단부는 외함에서의 열화상이고, 하단부는 상단부의 열화상을 3차원으로 표시한 것이다. 온도분포는 콘덴서 상단보다는 아래쪽이 높음을 알 수 있다. 측정 초기에 비해 1시간 경과 후에는 약간의 온도 변화가 존재하는 것으로 보이지만, 실제로는 큰 차이가 나지 않았다. 주로 온도분포는 하단에 집중하고 있음을 알 수 있다. 온도변화는 시간이 지남에 따라 약간씩 증가하다가 어느 정도 시점에서는 더 이상의 증가가 없이 거의 포화에 이른다는 것을 확인할 수 있었다. 측정결과 최대온도와 주위 온도와의 차이는 운전초기에 비해 2시간 운전 후에는 거의 2배에 가깝지만 온도차는 8℃정도로서 낮은 편이다.

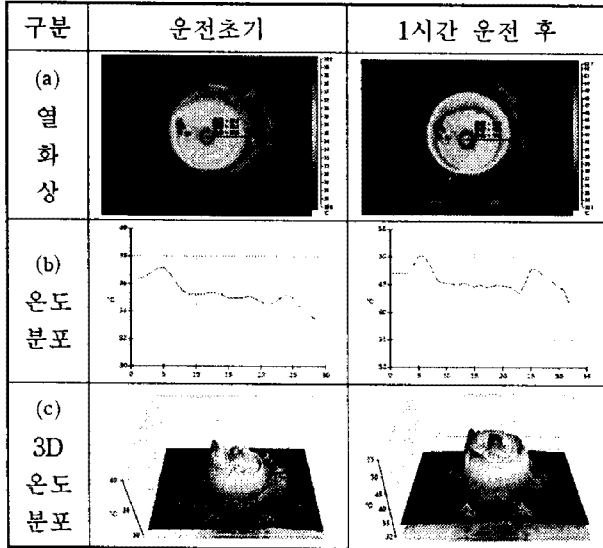
표 1 운전전과 1시간 운전후의 온도분포

구분	운전초기	1시간 운전 후
(a) 열화상		
(c) 3D 온도 분포		

다음은 콘덴서가 켄 내부에 3단적으로 배열된 경우에 대해 정격전압으로 300Hz가 되는 조건에서 120분간 측정한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2의 상단부(a)를 살펴보면 콘덴서의 중앙부에는 보빈으로 전극을 감을 수 있게 한 것으로서 처음에는 온도가 높다가 시간이 경과함에 따라 유전체를 감싸고 있는 외부 부분에서도 온도가 보빈 다음으로 높아졌으며 이 두 부분 사이에서는 온도분포가 다소 낮게 분포함을 확인할 수 있었다. 이는 표 2에서 중간부분(b)에 나타낸 것으로 확인할 수 있으며, 운전초기에 비해 2시간 경과 후에는 거의 온도

차가 2배 가까이 나는 것을 확인할 수 있었다. 표 2의 하단부 (c)에서 표시한 3차원 온도분포는 표 2의 상단부(a)에 대한 온도 분포로서 중앙부 보빈 부분에 온도가 가장 높게 분포하고 그 다음으로는 절연체를 감싸고 있는 부분이며, 콘덴서의 외함 바깥부분에는 내부에서의 온도가 잘 전도되지 않음을 알 수 있다.

표 2 운전초기와 1시간 후의 온도분포(3단 적)



주파수가 올라갈 경우 식 (5)에서와 같이 전압이 일정한 경우 콘덴서에 흐르는 전류의 정격주파수의 5배에 해당되는 전류가 흐르게 된다. 이 과전류는 콘덴서에 열을 발생시키게 된다.

다음 표 3은 콘덴서 내부에 3개의 소자가 병렬로 구성된 경우 표 2와 같은 운전조건하에서 콘덴서가 캔 내부에 3개 나란히 분포한 경우 300Hz로 운전한 경우의 온도분포를 나타낸 것이다.

표 3 운전전과 1시간 운전후의 온도분포(3개 병렬)

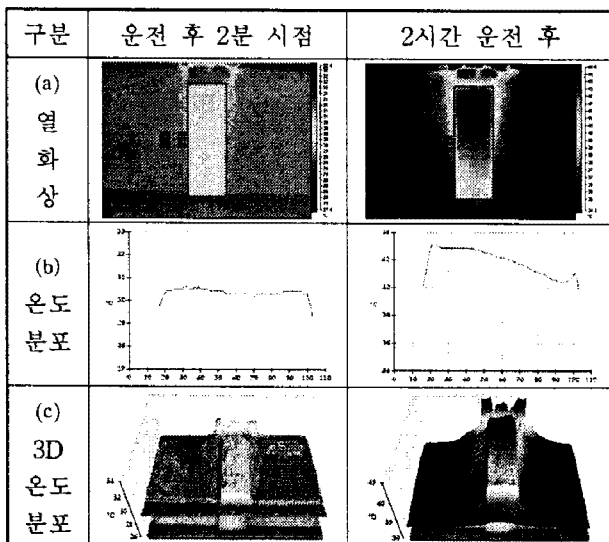


표 3의 상단부(a)에서와 같이 운전 초기에 비해 2시간 경과 후 온도분포도를 보면 온도가 매우 높아졌다는 것을 알 수 있다. 이는 콘덴서의 정격에 비해 높은 전류의 유입으로 인해 콘덴서 내부에서 발생하는 열이 상대적으로 높아졌기 때문이다. 표 3(b)에서와 같이 운전초기에는 콘덴서의 윗부분과 아랫부분에서의 온도차가 없이 거의 일정하지만 2시간 운전 후에 온도분포(b)참조)는 윗부분이 아랫부분보다 약간 높음을 알 수 있다. 표 3(a)에서의 열화상을 3차원으로 표현하면 표 3(c)와 같이 운전 초기에는 콘덴서 전체의 온도가 비슷하지만, 시간이 경과함에 따라 상단부가 하단부보다 온도가 더 높아짐을 알 수 있다.

콘덴서에서 허용하는 전압의 배수에 따라 약간씩 달라지지만 짧은 시간에서는 1.3배까지 허용하지만 장시간 운전하는 경우에는 1.1배 이하가 되도록 요구하고 있다. 본 연구에서는 정격전압과 1.1배의 전압이 인가될 경우 주파수를 정격에서 배수별로 조정하여 2시간에 걸쳐 내부에서의 온도변화를 측정하였다.

그림 1과 2는 주파수 변화에 따라 정격전압인 경우와 정격전압의 1.3배가 인가된 경우 2시간에 걸쳐 최대온도와 주위온도의 차이를 나타낸 것이다.

그림 1에서는 정격전압에서 주파수를 변화시켜 최대온도와 주위온도와의 차이를 나타낸 것이다. 60Hz의 주파수에서 정격전압으로 운전할 경우 처음이나 2시간 경과 후에도 온도는 거의 차이가 없지만, 주파수가 증가함에 따라 온도차는 더욱 높아짐을 알 수 있다.

그림 1에서 알 수 있듯이 주파수가 증가할 경우 식 (5)에서와 같이 콘덴서에 인가되는 전류가 증가하여 열의 발생이 점차 높아짐을 알 수 있다. 온도가 증가하는 기물기에도 주파수가 높을 경우 커짐과 일정시간이 경과함 다음에는 온도가 더 이상 증가하지 않고 포화하는 것도 알 수 있다. 주파수 증가에 따라 온도차는 일정하게 높아지지만, 5차와 6차의 경우 그 간격이 다소 줄어든 것이 특이하다고 할 수 있다. 7차 고조파의 경우가 다른 차수에 비해 온도차가 더 나는 이유는 과열에 의해 콘덴서의 유전체 표면을 감싸고 있는 부분에서 절연물이 녹아 액상형태로 되기 때문이다.

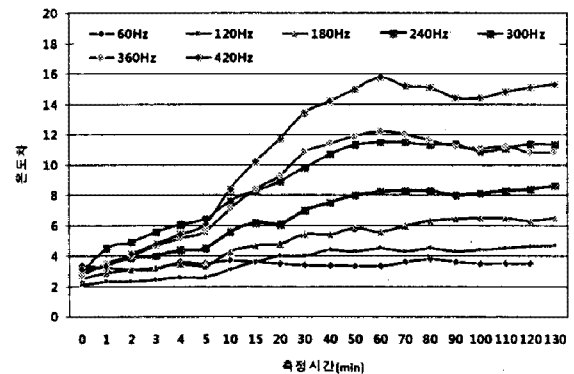


그림 1. 주파수 변화에 따른 온도변화(정격전압)

그림 1에서 주파수가 240Hz 까지는 최대온도와 주위온

도차가 10℃ 이하이지만, 240Hz 이상에서는 10℃를 초과하고 있다. 이럴 경우 식 (2)의 공식에 따른 경우 수명은 절반이하로 줄어들 수 있다.

그림 2는 정격전압의 1.3배에 해당되는 전압을 인가하고서 주파수 변화에 따라 최대온도와 주위온도와의 차이를 나타낸 것이다. 측정결과 그림 1에서와 같은 패턴의 변화를 나타내고 있으며, 온도차는 정격전압으로 운전하는 경우보다도 더 높아짐을 알 수 있다. 그림 1에서와 마찬가지로 240Hz까지는 온도차가 10℃이하이지만, 그 이상의 주파수에서는 온도차가 더욱 남에 따라 수명은 매우 짧아질 수 있다.

그림 2에서 7 고조파의 경우 온도차가 매우 심하게 나타나는 이유도 그림 1에서와 같이 전류가 높아질 경우 유전체를 감싸고 있는 절연물이 녹아 액체로 변해 온도가 올라가기 때문이다.

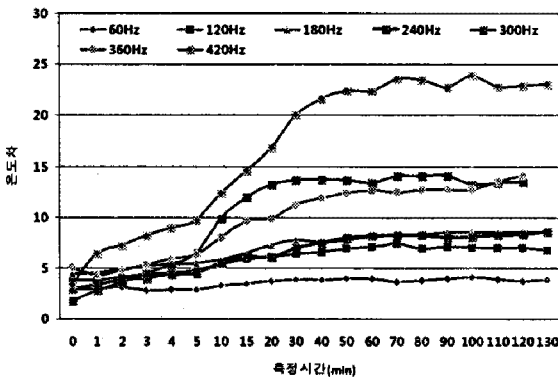


그림 2. 주파수 변화에 따른 온도변화(정격전압 1.3배)

5. 결론

본 연구에서는 선형부하에서 역률보상을 하고 비선형 부하에서는 직렬 리액터와 함께 고조파를 저감하는데 사용되는 콘덴서가 전압 및 전류의 변화에 따라 발생하는 열분포 특성을 전압 및 주파수의 변화에 따라 발생하는 온도와 주위온도와의 차이를 열화상카메라로 측정하여 분석하였다.

콘덴서 내부에서의 온도변화는 절연물체와 보호체에 의해 외부로 온도가 잘 전도되지 않아 정확한 온도를 알 수 없었다. 그러나 본 연구에서는 콘덴서 내부 소자의 온도변화를 확인하기 위해 소자를 밖으로 분리한 다음 전압과 주파수의 변화에 따라 변화를 온도분포를 측정하였다. 측정결과 주파수의 변화에 따라 최대온도와 주위온도와의 차이가 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 온도가 주파수를 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 것이 아니라 어느 정도 지나면 포화되어 더 이상 증가하지 않고 포화된다는 것도 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 고압의 경우에도 그대로 적용할 수 있을 것으로 생각하며 콘덴서 온도를 높이는 요소를 사전에 줄이고 증가한 온도로 지속적으로 운전하지 않도록 하기 위해서는 전류의 변화를 실시간으로 검지하여 온도상승을 미리 막는 것이

안전한 운전과 콘덴서 수명을 보장하는데 도움이 될 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행된 과제의 일부임(과제번호 : R-2007-3-186)

참고 문헌

- (1) Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005
- (2) 김종겸의 2인, "불평형 전압 동작시 전력 커패시터 특성 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.64-72, 2008. 05
- (3) Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008
- (4) 일본 전기학회 기술 보고서, "전력용 콘덴서 예방보전기술", 1994.11