



비용절감을 위한

변압기의 경제적 운영

Economical Operation for Transformer

윤 경 혁

효성중공업 (주) 생산기술과장

1. 서 론

변압기는 발전소, 변전소, 공장 및 가전제품 내부의 전자회로 등 각 계통의 요소요소에 적합한 전원을 쉽게 공급할 수 있는 이점과 전기 에너지가 손쉽게 열, 빛, 소리 및 운동 에너지 등 타 에너지로 변환 가능하며, 이동할 수 있는 장점때문에 그 수요가 급증하고, 전력계통의 경제적 운용을 위한 초초고압 전력의 수요, 유가 상승 등에 의한 에너지 발생비용의 증가 등에 따른 성 에너지화, 대용량화, 초고전압화로 지속적인 발전을 계속하고 있다.

변압기는 전기기기 중에서 비교적 효율이 높은 기기이지만 항상 전력회로에 연결되어 있어, 부하와 관계없이 항상 일정량의 무부하손을 소비하기 때문에 현재와 같은 고에너지 가격 시대에 있어서는 변압기의 효율적 운용을 통해 많은 경비를 절약할 수 있다.

따라서 변압기의 구매, 운전, 유지, 보수 등 변압기의 운용의 효율적인 방법을 모색해 보고자 한다.

2. 변압기의 라이프 사이클 코스트

변압기의 Life Cycle Cost는 변압기의 구매 발생비용, 운전, 유지, 보수비용 등으로 나눌 수 있다.

(가) 변압기 수명

변압기는 다른 전기기기와는 달리 정상적인 운전상태에서 그 수명이 반영구적이라 할 수 있으나, 절연물의 열화정도에 의하여 결정되며, 일반적으로 대략 10~30년 정도로 본다.

(나) 구매발생비용

변압기의 구매발생비용은 변압기의 구입 가격, 설치비용 및 금리이자를 포함한 비용을 말한다.

(다) 운전비용

변압기의 운전비용은 변압기의 손실에 의하여 발생하는 전력요금을 말한다.

(라) 유지, 보수비용

변압기는 변압기의 수명을 유지하기 위한 각종 보호기기, 절연유 등의 주기적인 점검, 교체, 여과 등의 유지, 보수비용이 발생한다.

3. 변압기의 경제적 구매

변압기 구매시에는 변압기의 부하의 종류에 따른 특수 변압기의 필요유무, 적정용량, 대수

의 선정, 운전비용의 절감을 위한 특성의 선정, 변압기의 수명연장을 위한 신뢰도, 유지·보수비의 절감 등 복합적인 면을 검토하여 결정하여야 한다.

가. 부하종류에 따른 변압기의 특수성

일반적으로 변압기는 일정한 전압, 주파수 등의 조건하에서 일정한 전압, 전류를 원하는 전압, 전류로 변환하는 간단한 기기이다.

그러나 최근 들어 전력전자분야, 전기 응용분야의 발달로 부하의 양상이 복잡하여짐에 따라 일반동력 또는 전동부하가 아닌 유도모, 아크로 및 정류기 등의 특수 부하조건에 의하여 발생하는 이상현상이 변압기를 비롯한 퓨즈, 콘덴서 등 여러 종류의 기기의 수명을 단축시키고 사고를 유발하는 예가 빈번해지고 있다.

특수부하가 변압기 및 타 기기에 미치는 영향을 살펴보면 표 1과 같다.

나. 변압기의 삼수, 용량, 대수의 결정

변압기의 용량은 부하율, 최대 소요부하량, 부하의 역률, 효율 및 중장기 부하계획에 의한 증가예상 부하량 등에 의하여 결정한다.

(1) 변압기의 최소 소요용량

변압기의 최소 소요용량은 최대 소요부하량, 부하의 역률, 효율 및 증가 예상 부하량으로 결정한다.

만일 정류기용 부하가 포함되어 있으면 정류기용 부하용량은 별도로 계산한다.

변압기최소 소요용량(kVA) = 최대부하량(kW) ÷ 역률 ÷ 기기의 효율 × 증가 예상량으로 결정할 수 있다.

- 예 1) 최대 부하량 : 400kW, 기기의 효율 : 87%, 증가예상량 : 15%일때, 역률 : 90%,
 변압기 최소 실소용량 : $400 \div 0.9 \div 0.87 = 511\text{kVA}$
 변압기 최소 소요용량 : $511\text{kVA} \times 1.15 = 588\text{kVA}$

(2) 변압기의 표준용량

변압기의 용량은 변압기 표준용량중 최소 소요용량에 가장 근접한 큰 용량을 선택한다. 국내에서는 한국공업표준 규격(KS)과 한국전력표준규격(ESB)에 일부 표준용량이 정해져 있지만 널리 일반에 통용되어 있지 않을 뿐만 아니라 변압기 제조업체에서 어느 용량의 변압기든 소비자의 요구에 따라 제작이 가능하여 공통

〈표 1〉 특수부하의 문제발생 요인

부하의 종류	문제발생 요인	전기기기에의 영향	방 지 대 책
정 류 기 (Rectifier, Thyristor)	① 고조파전압, 전류발생 ② 정류시 중첩전압, 전류에 의한 단락발생 ③ 역률보상용 콘덴서와의 병렬공진에 의한 이상전위 상승	① 소음증가 ② 과부하 운전 ③ 절연 노화 ④ 퓨즈의 잦은 단선 ⑤ 리액터 콘덴서의 절연 파괴	① 정류기용 변압기 설치 별도 ② 고조파 차단장치 설치 ③ 기기 파전압 내력보강 ④ 시스템 설계시 고조파 영향을 고려한 설계
아 크 로	① ARC에 의한 전위상승 ② 이상과형 발생 ③ 대전류 통전	① 소음 증가 ② 이상전위에 의한 절연노화 ③ 대전류에 의한 변압기내부 기계력 파괴	① 로용 변압기 사용
유 도 모	① 대전류 통전 ② 부하의 삼상불평형	① 변압기 내부 기계력 파괴 ② 국부 과열	① 로용 변압기 사용

적으로 통용되는 용량은 없다.

그러나 가장 널리 사용되고 있는 용량을 살펴 보면 표 2와 같다.

예 2) 변압기 최소 실소용량 : 511kVA

변압기 최소 소요용량 : 588kVA인 경우 750kVA 선정시 여유율 (47%)이 과다하다고 생각된다면 600kVA (여유율 : 17.4%)로 선정할 수 있다.

(3) 변압기 뱅크 구성방법의 결정

변압기의 용량이 선정되면 변압기의 Bank 구성방법을 결정한다.

즉 삼상 변압기 1대를 사용할 것인가, 단상 변압기 3대를 1 Bank로 사용할 것인가, 아니면 단상 변압기 2대를 V결선을 하여 사용할 것인가를 결정하여야 한다.

일반적으로 삼상 변압기 1대를 사용하는 것이 가장 경제적이거나 사고 발생시 대처방안이 없으며, 단상 변압기 Bank 운전시는 비경제적이긴 하지만 1개 변압기에 사고가 발생하면 부하용량을 조정하여 당분간 V결선으로 임시 운전이 가능한 이점이 있다.

그러나 최근에는 국내 변압기 제조회사들의 기술발전과 보호장치 발달로 설비의 신뢰성이 많이 향상되어 삼상 변압기 1대 운전이 바람직하다고 할 수 있다.

최소 실소요용량 511kVA가 소요되는 부하의 경우 변압기 가격 및 손실이 표 3과 같을 때 각 방안별 경제성을 검토해 보면 표 4와 같다.

(4) 변압기의 최고 효율점에 의한 용량 선정

변압기의 최고 효율점은 부하손(동손)과 무부하손(철손)이 동등해질 때이다. 일반적으로 부하손에 대한 무부하손의 비율인 손실비가 약 3 ~ 4%에 해당되므로 변압기의 효율과 부하율의

〈표 2〉 표준용량

단상변압기 (kVA)						삼상변압기 (kVA)					
5	7.5	10	15	20	30	50	75	100	150	200	250
75	100	150	200	250	300	300	400	500	750	1,000	
400	500	750	1,000	1,200		1,500	2,000	2,500	3,000		
1,500	2,000	2,500	3,000			5,000	7,500	10,000	12,000		
4,000	5,000	7,500				15,000	20,000	30,000			
						45,000	60,000	100,000			

〈표 3〉 변압기의 금액, 손실표

상수 / 용량	대당금액	철 손	동 손	효 율
3 φ 600kVA	516만원	1.9kW	7.7kW	98.4%
1 φ 200kVA	206만원	0.7kW	2.9kW	98.2%
1 φ 350kVA	281만원	1.1kW	4.5kW	98.4%

〈표 4〉 뱅크 구성별 경제성 비교

방 안	3 φ 1대 운전시	1 φ 3대 Δ결선시	1 φ 2대 V-결선시
최소 실소요 용량	511 kVA	511 kVA	511kVA
변압기용량 / 대수	600kVA / 1대	200kVA / 3대	350kVA / 2대
여 율	17.4%	17.4%	18.6%
변 압 기 가 격	516만원	618 만원	562 만원
총 철 손	1.9kW	0.7×3=2.1kW	1.1×2=2.2kW
총 동 손	7.7×(511/600) ² 5.6kW	2.9×3×(511/600) ² 6.3kW	4.5×2×(590/700) ² 6.4 kW
총 손 실	7.5kW	8.4kW	8.6 kW

관계는 그림 1 과 같으며, 부하율이 45~55%인 경우 가장 효율이 좋다.

또한 동일 효율의 변압기라 할지라도 손실비가 큰 변압기가 전일 효율이 높다. 특히 야간의 경부하 운전시간이 많은 부하율이 비교적 낮은 일반 제조업의 경우에는 손실비가 큰 변압기의 구입시 의외로 많은 전력요금의 절감을 기대할 수 있다.

동일 용량(600kVA), 동일 효율(98.4%)인 변압기의 손실비가 서로 다른 두 변압기의 경우 비교적 부하율이 낮은 일반 제조업의 회사(그림 2)와 부하율이 높은 장치산업의 회사(그림 3)와의 경우를 살펴보면 예 3에서와 같이 일반제조업 쪽이 손실비가 낮은 변압기보다 손실비가 큰 변압기를 사용함으로써 더 많은 손실절감을 기대할 수 있다.

예 3) 부하율이 그림 2와 같은 일반제조업의 회사의 경우

$$\text{일일 총부하량} : 15 \times 10\text{h} + 40 \times 3\text{h} + 80 \times 8\text{h} + 60 \times 3\text{h} = 1,090$$

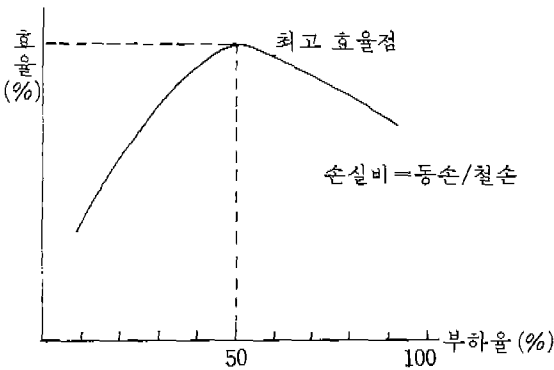
$$\text{일일 총시설용량} : 100 \times 24 = 2,400$$

$$\text{부하율} : (1090/2400) \times 100 = 45.4\%$$

◎ 철손 : 1.9kW, 동손 : 7.7kW, 손실비 : 4.05인 경우

$$\text{일일 총철손} : 1.9 \times 24 = 45.6\text{kWh}$$

$$\text{일일 총동손} : 7.7 \times (0.15^2 \times 10 + 0.4^2 \times 3 + 0.8^2 \times 8 + 0.6^2 \times 3) = 53.2\text{kWh}$$



〈그림 1〉 효율과 부하율의 관계

$$\text{일일 총손실} : 45.6 + 53.2 = 98.8\text{kWh}$$

◎ 철손 : 2.4kW, 동손 : 7.2kW, 손실비 : 3.00인 경우

$$\text{일일 총철손} : 2.4 \times 24 = 57.6\text{kWh}$$

$$\text{일일 총동손} : 7.2 \times (0.15^2 \times 10 + 0.4^2 \times 3 + 0.8^2 \times 8 + 0.6^2 \times 3) = 49.7\text{kWh}$$

$$\text{일일 총손실} : 57.6 + 49.7 = 107.3\text{kWh}$$

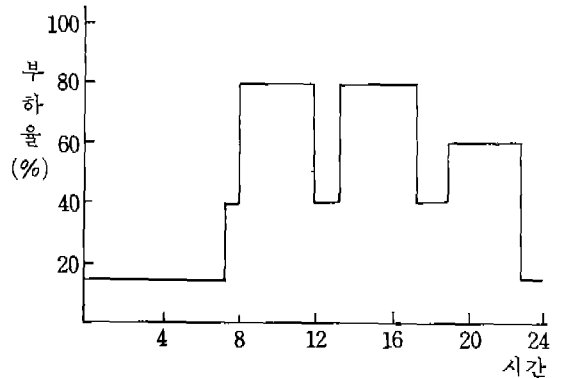
※ 손실비가 큰 변압기가 1일 8.5kWh의 손실이 절감된다.

반면 부하율이 그림 3과 같은 장치산업의 회사의 경우

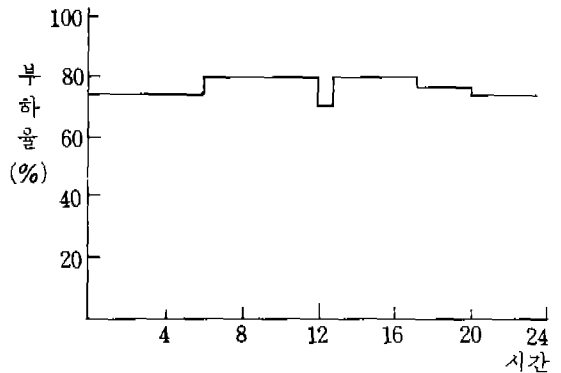
$$\text{일일 총부하량} : 70 \times 11\text{h} + 80 \times 8\text{h} + 75 \times 5\text{h} = 1,785$$

$$\text{일일 총시설용량} : 100 \times 24 = 2,400$$

$$\text{부하율} : (1785/2400) \times 100 = 74.4\%$$



〈그림 2〉 부하율이 낮은 경우



〈그림 3〉 부하율이 높은 경우

◎철손 : 1.8kW, 동손 : 7.7kW, 손실비 : 4.05인 경우
 일일 총철손 : $1.9 \times 24 = 45.6 \text{ kWh}$
 일일 총동손 : $7.7 \times (0.7^2 \times 11 + 0.8^2 \times 8 + 0.75^2 \times 5) = 102.6 \text{ kWh}$
 일일 총손실 : $45.6 + 102.6 = 148.2 \text{ kWh}$

◎철손 : 2.4kW, 동손 : 7.2kW 손실비 : 3.00인 경우
 일일 총철손 : $2.4 \times 24 = 57.6 \text{ kWh}$
 일일 총동손 : $7.2 \times (0.7^2 \times 11 + 0.8^2 \times 8 + 0.75^2 \times 5) = 95.9 \text{ kWh}$
 일일 총손실 : $57.6 + 95.9 = 153.5 \text{ kWh}$

※ 손실비가 큰 변압기가 1일 5.3kWh의 손실이 절감된다.

다. 손실평가 구매

변압기는 수명이 10년 이상 반 영구적인 전기기기이므로 장기적 안목에서 구매 발생비용이 다소 크더라도 손실이 적은 변압기를 구매, 사용함으로써 운전비용을 절감하여 전체적인 총 발생비용을 절약할 수 있다.

손실평가 구매제란 구매시 구매 발생비용과 운전비용을 합한 금액으로 변압기 가격을 평가하여 구매하는 방법이다.

국제입찰의 경우 대부분의 국가가 1970년대부터 손실평가제를 도입하였으며, 국내에서는 한국전력공사 물량의 일부 및 몇몇 정부투자 시설물의 국제입찰시 손실평가제를 도입하고 있다.

손실평가제를 도입할 경우 소비자는 초기투자비(구매발생 비용)는 다소 부담이 큰 반면 저손실 변압기를 구매함으로써 운전비용(전력요금)을 줄일 수 있을 뿐 아니라 생산자는 변압기의 저 손실화에 대한 설계 및 제작기술의 발전을 유도할 수 있다.

또한 국가적인 안목에서 살펴보면 정부의 전력시설 투자량을 줄일 수 있으며 전력 예비율을 높일 수 있는 이점이 있다.

(1) 손실평가 방법

손실평가 방법은 변압기 구매가격과 일정기간 동안(변압기수명 평가연한: 10~15년)의 구매가격에 대한 금리이자에 변압기 운전시 발생하는 운전비용(대부분이 손실에 의한 전력요금)을 합한 금액으로 변압기를 평가하는 방법을 말한다.

따라서 금리이자, 전력요금 등을 감안하여 무부하손 금액, 부하손 금액을 현가로 환산하여 다음식으로 최종 정리하여 평가한다.

$$\text{변압기 손실평가금액} = \text{변압기 가격} \times \text{현가환산계수} + \text{무부하손} \times \text{무부하손 평가금} + \text{부하손} \times \text{부하손실 평가금}$$

(2) 손실평가 금액의 결정

무부하손실 평가금액, 부하손실 평가 금액을 각 사의 금리조건, 전력요금, 가동시간, 부하율, 부하역률 및 설비평가 연한에 따라 서로 다르므로 자사의 여건을 감안, 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\text{현가환산계수} = \text{평가연한까지의 발생 이자의 합} \div \text{변압기 가격} + 1$$

$$\text{무부하 손실금액} = \text{전력요금} \times 1 \text{ 일 무부하 운전시간} \times \text{연평균 운전일수} \times \text{평가연한}$$

$$\text{부하 손실금액} = \text{전력요금} \times (\text{평균부하율} / 100)^2 \div \text{역률} \times 1 \text{ 일 부하운전시간} \times \text{연평균 운전일수} \times \text{평가연한}$$

예 4) 전력요금 : 60원/kWh, 평가연한 : 15년, 운전시간 : 24시간, 연평균 무부하 운전일수 : 365일, 평균부하율 : 46.7%, 역률 : 0.9, 1일 부하운전시간 : 24시간, 연평균 부하운전일수 : 290일인 회사의 경우

$$\text{무부하손실 평가금액} = 60 \times 24 \times 365 \times 15 = 7,884,000 \text{ 원}$$

$$\text{부하손실 평가금액} = 60 \times 24 \times 290 \times 15 \times (1/0.9) \times (0.467)^2 = 1,517,899 \text{ 원}$$

현가환산계수 = 1.9 (이자율과 평가연한에 의해 계산)

A 변압기 : 3φ 600kVA 무부하손 : 1.9kW, 부하손 : 7.7kW, 가격 : 516만원

B 변압기 : 3φ 600kVA 무부하손 : 1.5kW,

부하손 : 7.0kW, 가격 : 580만원

역률 0.95시의 손실 : $1.9 + 7.7 / 0.95 = 10.01$ kW

〈A, B변압기의 손실평가금 비교〉

비 교 항 목	A	B
구 입 비	516 만원	580 만원
현 가 환 산 비	980.4만원	1,102 만원
무부하손실평가비	1,498 만원	1,182.6만원
부하손실평가비	1,168.8만원	1,062.5만원
총 평 가 금 액	3,647.2만원	3,347.9만원

즉, B변압기 구입시 15년동안 300.1만원 절감 가능.

4. 변압기의 경제적 운전

가. 과전압 억제

변압기의 과전압은 철심의 자속수를 증가시켜 무부하손과 여자전류를 증가시키며, 소음의 증가 및 수명단축의 요인이 된다.

따라서 변압기에 10% 이상의 과전압이 공급 되지 않도록 하여야 한다.

나. 역률개선 효과

변압기의 용량(kVA)은 $VI \cos\phi$ 이며 $\cos\phi$ 를 역률이라 한다. 역률은 부하의 종류와 양에 따라 변화한다. 즉 부하에 용량성 부하가 많으면 진상역률, 유도성 성분이 많으면 지상역률로 나타내진다. 일반적으로 유도전동기 등 유도성 부하가 많은 경우에는 역률이 현저히 나쁘다.

이때에는 역률보상용 콘덴서를 설치하여 역률을 보상하여 준다. 각 기기의 역률은 대략 백열등 1, 형광등 0.9, 단상전동기 0.6~0.8, 삼상전동기 0.7~0.9, 선풍기 0.6~0.8, 전열기 1 등이다.

예 5) 3φ 600kVA 무부하손 1.9kW, 부하손 7.7kW, 역률 0.8을 역률 0.95로 개선하면

역률 0.8시의 손실 : $1.9 + 7.7 / 0.8 = 11.53$ kW

약 1.52kWh 절감효과가 있다.

다. 병렬운전

(1) 병렬운전

부하용량의 증가로 변압기를 증설하여 설비의 여유가 발생할 경우에 변압기를 병렬운전함으로써 에너지 비용을 절감할 수 있다.

또한 심야 등 경부하시에는 한쪽 변압기를 분리하여 한 대의 변압기로 전력을 공급함으로써 전기요금 절감을 기할 수 있다.

(2) 병렬운전 조건

변압기를 병렬운전하기 위하여는 두 변압기가 다음과 같은 조건을 갖추어야 한다.

- (가) 변압비가 같을 것
- (나) 각 변위가 같을 것
- (다) 백분율 임피던스의 차이가 평균치의 10% 이내일 것
- (라) 정격용량의 비가 1 : 3 이내일 것

(3) 병렬운전시의 부하분담과 손실

병렬운전시 백분율 임피던스가 같을 경우 두 변압기의 부하분담은 용량비에 따라서 분담되므로 두 변압기의 부하율이 같아져서 예 6과 같이 병렬운전을 할 경우 경제적인 운전이 가능하다.

예 6) 500kVA 용량을 사용하고 있는 무부하손 1.9kW, 부하손 7.7kW인 600kVA 변압기와 120kVA 용량을 사용하고 있는 무부하손 0.7kW, 부하손 2.9kW인 200kVA 변압기 두대를 각각 단독 운전시와 병렬 운전시의 손실을 비교해 보면

• 단독 운전시 :

600kVA 변압기 손실 : $1.9 + 7.7 \times (500 / 600)^2 = 7.25$ kW

200kVA 변압기 손실 : $0.7 + 2.9 \times (120 / 200)^2 = 1.74$ kW

총소비전력 : $7.25 + 1.74 = 8.99$ kW

• 병렬 운전시 :

600kVA 변압기 손실 : $1.9+7.7 \times (465/600)^2 = 6.52\text{kW}$

200kVA 변압기 손실 : $0.7+2.9 \times (155/200)^2 = 2.44\text{kW}$

총소비전력 : $6.52+2.44=8.96\text{kW}$

병렬 운전시의 절감가능 소비전력 : $8.99 - 8.96=0.03\text{kW}$

(4) 경부하시 단독운전

일반 제조업의 경우 야간에는 주간에 비하여 부하가 현저히 줄어든다. 이 경우 변압기 1대를 분리하여 단독운전을 하는 것이 경제적인 수가 있다. 일반적으로 경부하시의 부하량이 20% 이하일 경우 변압기를 분리하여 1대 단독운전하는 편이 예 7과 같이 유리하다.

예 7) 전 부하 620kVA를 무부하손 1.9kW, 부하손 7.7kW인 600kVA 변압기와 무부하손 0.7kW, 부하손 2.9kW인 200kVA 변압기로 병렬 운전시 야간 10시간 120kVA로 600kVA 또는 200kVA 변압기를 단독운전할 경우

• 병렬 운전시 :

600kVA 변압기 손실 : $1.9+7.7 \times (90/600)^2 = 2.08\text{kW}$

200kVA 변압기 손실 : $0.7+2.9 \times (30/200)^2 = 0.77\text{kW}$

총 소비전력 : $2.08+0.77=2.85\text{kW}$

• 600kVA 단독 운전시 : $1.9+7.7 \times (120/600)^2 = 2.21\text{kW}$

절감가능 소비전력 : $2.85-2.21=0.64\text{kW}$

1일 절감량 : $0.64 \times 10 = 6.4\text{kWh}$

• 200kVA 단독운전시 : $0.7+2.9 \times (120/200)^2 = 1.74\text{kW}$

절감가능 소비전력 : $2.85-1.74=1.11\text{kW}$

1일 절감량 : $1.11 \times 10 = 11.1\text{kWh}$

라. 과부하 운전

변압기는 규격에 따라 정해진 조건(설치장소, 주위온도 등)하에서 정격용량으로 온도상승 범

〈표 5〉 절연종류별 온도상승 한도

절 연 종 류	A 종	B 종	H 종
최 고 허 용 온 도	105℃	130℃	180℃
온도상승한도(저항법)	55℃	95℃	135℃

〈표 6〉 강제송풍 냉각시의 용량 증가율(NEMA)

종 류	자연 냉각시의 용량		용 량 증가율
	단 상	삼 상	
유입변압기	501~2,499kVA	501~2,499kVA	115 %
	2,500~9,999kVA	2,500~11,999kVA	125 %
	10,000kVA 이상	12,000kVA 이상	133.3%
전식변압기	501kVA 이상	501kVA 이상	133.3%

위 내에서 사용하도록 제작되고 있다.

따라서 과부하 운전은 변압기 내부의 절연노화의 원인이 되므로 피하여야 한다.

그러나 일반적으로 유입자냉식 또는 전식자냉식 변압기의 경우, 송풍기를 이용하여 강제냉각을 시켜 온도상승을 시험치(또는 규격치)와 동일수준으로 억제한다면 어느 정도의 과부하 운전은 가능하다.

이 경우 주의하여야 할 점은 변압기의 유온상승을 시험치(규격치)와 동일수준 이하로 억제한다 할지라도 변압기 내부의 최고 온도상승 지점(권선내부 또는 철심 등)의 온도상승은 사용절연물의 온도상승 허용치를 초과할 수 있으므로 장기적인 과부하운전은 피하는 것이 좋다.

미국 전기기기 제조업체 규격(NEMA)에 의하면 강제 송풍냉각시 용량증가 가능 허용치는 표 6과 같다.

그러나 이 경우 변압기 설계시 자연냉각시와 강제송풍냉각시의 온도상승이 허용치(규격치) 이하가 되도록 설계·제작하므로 일반적으로 자연냉각식으로만 설계된 변압기의 강제송풍 냉각시 용량은 제작자와 협의하여 정할 필요가 있다.

〈계 속〉