

1. 머리말

근래에 들어 테크노마트 등과 같은 초고층 복합용도의 첨단정보 빌딩(최신의 빌딩자동화시스템, 사무자동화시스템, 정보통신시스템과 양질의 건축자재, 구조를 갖고 경제성이 종합적으로 고려되며, 장래 정보화에 완벽하게 대응할 수 있는 유연성을 가진 건축물)과 정보화주택, 사이버주택 등이 증가하고 있다. 이와 같은 건축물에 있어서는 순간 정전도 허용하지 않는 대형 컴퓨터 및 OA기기의 사용이 급증함은 물론 빌딩 기능이 고도화되면서 냉방부하용 전력소비가 크게 증가되어 전기 에너지 소비가 매년 급속히 증가하고 있는 실정이므로 효율적인 전력관리 및 전기수용설비의 적절한 수요 관리가 절실하게 필요하다.

효율적 전력관리 기법은 크게 부하관리, 역률관리, 전압관리로 나눌 수 있으며, 무엇보다도 역률관리는 중요하다.

전력부하는 일반적으로 유도성 부하로 인하여 낮은 역률의 무효전력이 발생하게 되며, 전기설비 중 비교적 역률이 나쁜 부하는 동력부하로서 전체 전력부하의 약 2/3 정도에 해당한다. 이로 인하여 선로 손실과 변압기 부하 손실이 증가하고, 전압강하 및 수전설비용량이 커지게 된다. 또한 역률이 90% 이하를 유지하게 될 경우 전기공급 규정에 의하여 전기요금을 누진으로 부담하게 된다.

따라서, 무효전력 발생분을 줄이기 위하여 진상용 콘덴서를 설치, 역률을 개선하여야 한다. 그러나 역률을 지나치게 높게 하여 진상(進相) 상태를 유지하게 되면 전압과형의 일그러짐 및 계기의 오동작, 페런티 현상으로 인한 말단 전압 상승이 일어나 전기제품의 손상 등을 일으킬 우려가 있으므로 역률은 반드시 지상(遲相)을 유지할 수 있도록 하여야 하고, 경부하시에 콘덴서를 자동 개폐 제어할 수 있어야 한다.

역률개선용 콘덴서는 부하말단에 설치하는 것이 합리적인 전력사용을 위해 바람직하지만, 관리의 용이성과 설치비가 저렴하다는 이점 등으로 수전단측에만 콘덴서를 설치하여 역률을 보상하고 있는 수용가도 상당히 있는 것으로 지적된다. 따라서, 전동기 부하측과 변압기 모선측에 분산 설치하는 방법이 가장 바람직하다.

본고에서는 전기설비 기술자들이 소홀히 취급하고 있는 교류전력과 역률의 의미를 살펴보고, 역률개선 이점과 역률개선용 콘덴서 용량 산정방법에 대해 기술한다. 그리고 역률관리 합리화 운용사례를 소개한다.

2. 교류전력과 역률

직류 회로이든 교류 회로이든 전압을 인가하여 회로에 전류가 흐르게 되면, 부하에서는 전압과 전류를 곱한 것

전력관리

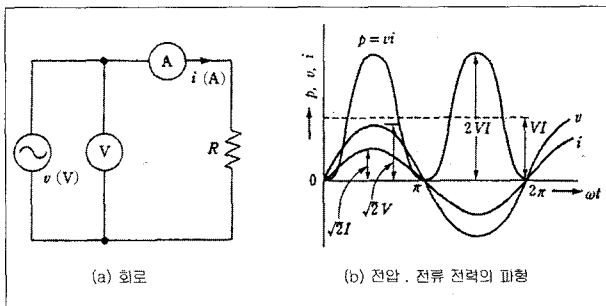
과 같은 크기의 전력이 소비된다.

교류 회로의 전압과 전류는 시간에 따라 크기와 방향이 달라지므로 교류 회로의 전력을 구하는 것이 직류 회로의 경우보다 훨씬 더 복잡하다. 여기에서는 교류 회로의 전력을 구하는 방법과 역률에 대해서 알아본다.

가. 교류의 전력과 역률

(1) 저항 부하의 전력

부하가 저항만으로 이루어진 회로의 전력은 그림 1의 (a)와 같으며, 부하가 저항 R만으로 구성되어 있으므로 전압 v 와 전류 i 의 곱 p 를 순시전력이라고 한다. 전압 v 와 전류 i 가 시간에 따라 크기와 방향이 주기적으로 변화하기 때문에 순시전력 p 도 그림 1의 (b)와 같이 주기적으로 바뀌게 된다.

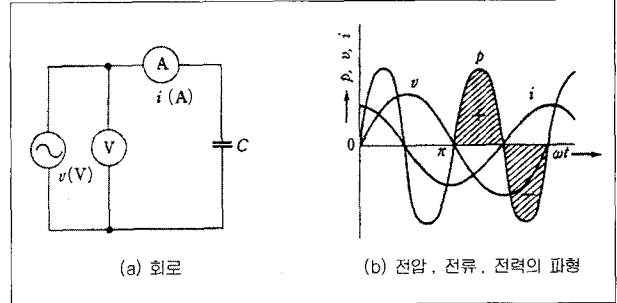


〈그림 1〉 저항 부하인 경우의 전력

이 순시전력 p 의 1주기에 대한 평균값을 전력 또는 교류전력이라고 한다. 순시전력 p 의 평균값을 그림 (b)를 통해서 구해 보면, 평균값 $P(W)$ 는 그림 (b)에 점선으로 나타낸 것처럼 곡선 p 의 최대값, 즉 $\sqrt{2}V \times \sqrt{2}I = 2VI$ 의 반이 되므로

$$P = VI \text{ (W)} \quad (1)$$

가 된다. 따라서, 저항 부하의 경우 전력은 전압의 실효값과 전류의 실효값을 곱한 것과 같다.



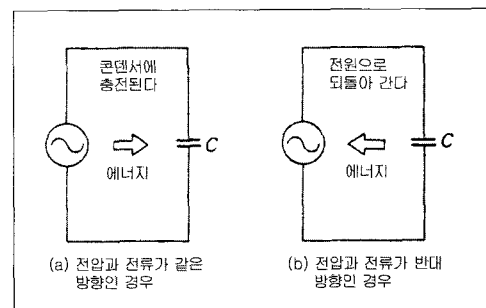
〈그림 2〉 콘덴서 부하인 경우의 전력

(2) 리액턴스 부하의 전력

콘덴서로 이루어진 회로를 그림 2의 (a)와 같이 나타내면, 전압 V 와 이보다 위상이 $\frac{\pi}{2}$ (rad) 앞서는 전류의 파형은 각각 그림 (b)의 곡선 v 와 i 가 같이 되고, 순시전력 p 는 v 와 i 의 곱으로서 식 (2)와 같고, 파형은 그림 (b)의 곡선 p 와 같이 된다.

이 경우의 전력은 전압과 전류의 방향(부호)이 서로 같을 때는 +, 서로 다를 때는 -로 변화하므로, 1주기 평균값을 취하면 0이 된다. 즉, 반주기 동안에는 전원에서 부하에 전력이 공급되고, 다음 반주기 동안에는 공급된 그 전력이 전원으로 되돌려진다.

그림 3과 같이 +의 경우는 공급된 전력이 정전 에너지로서 콘덴서에 축적되며, -의 경우는 콘덴서가 방전을 하여 축적된 에너지가 전원으로 되돌려 보내진다.



〈그림 3〉 콘덴서 부하의 에너지 이동

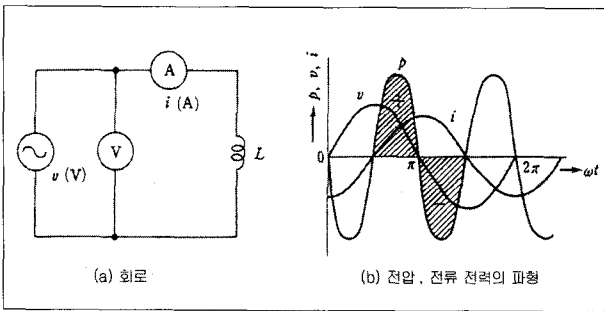
이 경우의 순시 전력 p 를 구해 보면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 p &= v \times i = \sqrt{2} V \sin \omega t \times \sqrt{2} I \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\
 &= \sqrt{2} V \sin \omega t \times \sqrt{2} I \cos \omega t \\
 &= 2VI \sin \omega t \cdot \cos \omega t \\
 &= VI \sin 2\omega t \quad (\text{VA}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

즉, 위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 순시전력 p 는 전압과 전류보다 2배 빠르게 변화하지만, 사인파형이므로 1주기에 대해서 평균을 취하면 0이 된다. 따라서, 용량 리액턴스 부하를 갖는 교류 회로에서는, 부하에 전류가 흘러도 부하에서 소비되는 전력은 없다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 유도 리액턴스 부하에 있어서의 순시전압 v , 순시 전류 i 및 순시전력 p 의 파형을 나타낸다. 유도 리액턴스의 경우에는 전원에서 공급된 전력이 전자 에너지로 코일에 축적되었다가 다시 전원으로 되돌려진다.

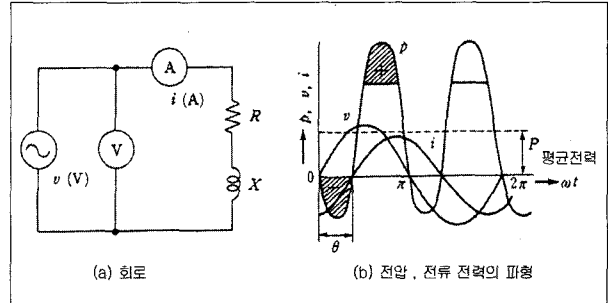
따라서, 용량 리액턴스 부하의 경우와 마찬가지로 평균 전력은 0이 되어 회로에서 소비되는 전력은 없다는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 인덕턴스 부하인 경우의 전력

(3) 임피던스 부하(일반 부하)의 전력

그림 5의 (a)와 같이 저항과 유도 리액턴스가 직렬로 접속된 회로의 전력을 살펴보기로 한다. 전압을 기준으로 하면, 전압 v 와 전류 i 는



〈그림 5〉 임피던스 부하인 경우의 전력

$$v = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad (\text{V})$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \theta) \quad (\text{A})$$

로 표시할 수 있고, 이것들을 그림으로 나타내면 그림5의 (b)와 같이 나타낼 수 있다.

또한, 순시 전력 p 는 v 와 i 의 곱으로 식 (3)과 같고, 파형은 그림(b)의 곡선 p 와 같이 된다. 이 경우 -전력의 부분과 +전력의 윗부분과는 서로 상쇄되어 순시전력 p 의 평균값은 그림(b)에서처럼 평균전력 P 의 점선으로 나타낼 수 있다.

여기서, 순시 전력 p 는 다음과 같이 계산된다.

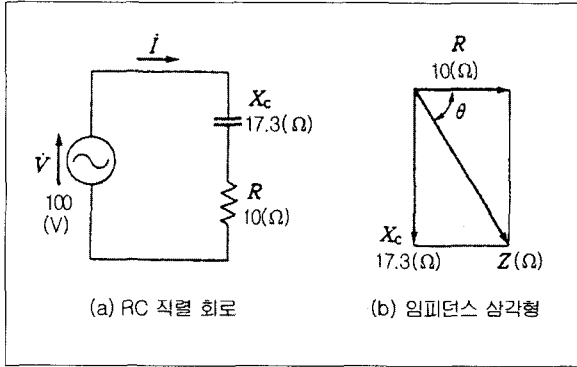
$$\begin{aligned}
 p &= v \times i = \sqrt{2} V \sin \omega t \times \sqrt{2} I \sin(\omega t - \theta) \\
 &= 2VI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \theta) \\
 &= VI \cos \theta - VI \cos(2\omega t - \theta) \quad (\text{VA}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

또, 임피던스 부하의 전력 $P(W)$ 는, 위의 식의 순시 전력 p 를 1 주기에 대해서 평균값을 취하여 다음과 같이 구해진다.

$$P = VI \cos \theta \quad (\text{W}) \quad (4)$$

(4) 역률

일반적으로 교류 회로의 전력은 평균 전력 $P = VI \cos \theta$ 로 나타낸다. 여기서, θ 는 회로에 가한 전압 v 와 전류 i 의 위상차이다. 따라서, 저항 R 만의 회로와 같이 전압과 전류가 동상인 경우에 전력은 $P = VI$ 이며, 직류 회로인 경우와 똑같이 취급할 수 있다.



〈그림 6〉 RC 직렬회로

그러나 RL 회로나 RC 회로(그림 6 참조)와 같이 리액턴스 성분이 있으면 전압 v 와 전류 i 사이에는 위상차 θ 가 생겨 저항 R만인 회로의 전력에 $\cos \theta$ 를 곱한 만큼의 전력이 소비된다. 이 $\cos \theta$ 를 전원에서 공급된 전력이 부하에서 유효하게 이용되는 비율이라는 의미에서 역률(Power Factor)이라고 부르며, θ 는 역률각이라 한다. 역률은 수치 또는 백분율로 나타내는데, 0~1(0~100(%))의 값을 가진다.

역률은 부하 임피던스의 저항 성분이 $R(\Omega)$, 리액턴스 성분이 $X(\Omega)$ 일 경우 다음 식에 의해 구한다.

$$\cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (5)$$

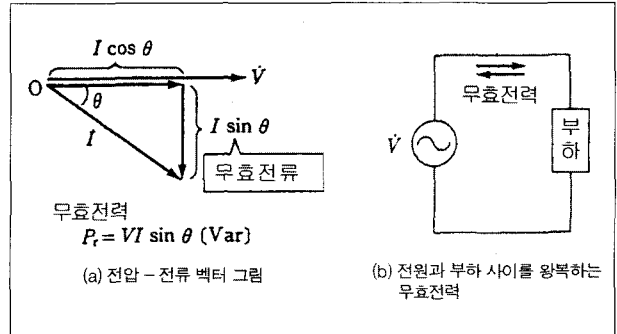
나. 피상전력과 역률 개선의 필요성

(1) 피상전력, 유효전력, 무효전력

저항 부하인 경우 전압과 전류는 동상이므로 전력은 $P=VI(W)$ 가 된다.

그러나 전동기와 형광등 등의 각종 부하는 보통 저항과 리액턴스 성분을 함께 가지고 있으므로, 전압과 전류 사이에는 위상차가 생긴다.

그림 7의 (a)에 전압을 기준으로 한 전압과 전류의 벡터 그림이 그려져 있다. 전류는 전압과 동상인 성분과, 전



〈그림 7〉 무효 전력

압보다 위상이 $\frac{\pi}{2}$ (rad) 뒤진 성분으로 분해된다. 따라서 부하에서 소비되는 전력은, 식 (4)와 같이 $VI \cos \theta$ 로 된다.

여기서, 전압과 전류와의 곱 VI 를 피상전력(Apparent Power)이라 하고, 단위는 볼트 암페어(VA) 또는 킬로볼트 암페어(kVA)를 사용한다.

피상 전력을 $P_a(VA)$ 라 하면, P_a 는 다음 식과 같다.

$$P_a = VI(VA) \quad (6)$$

즉, 피상 전력은 역률을 고려하지 않고 단지 전압과 전류의 실효값을 곱한 것으로, 교류 전원의 용량 등을 표시하는 데 사용한다. 그리고 어떤 소자의 피상전력과 전압을 알면, 그 소자에 흐르는 최대 전류를 알 수 있다.

예를 들면 100V의 전압이 인가된 회로의 피상전력이 5(kVA)라면 그 회로에 흐를 수 있는 최대전류는

$$I = \frac{5,000}{100} = 50(A)$$

가 된다.

식 (4)의 전력 $P = VI \cos \theta (W)$ 는 피상전력 중에서 부하에 유효하게 이용되는 전력이므로, 이것을 유효전력(Effective Power) 또는 단순히 전력이라 한다.

그림7의 (a)와 같이 회로에 흐르는 전류 $I(A)$ 중에서 전압과의 위상차가 $\frac{\pi}{2}$ (rad)인 성분 $I \sin \theta (A)$ 와 전압 $V(V)$ 와의 곱 $VI \sin \theta$ 은 코일이나 콘덴서에 저장되

있다가 다시 전원에 되돌려지기만 하고, 전력으로는 이용되지 않으므로 이것을 무효전력(Reactive Power)이라 한다.

무효전력 P_r 은 다음 식으로 나타낸다.

$$P_r = VI \sin \theta \text{ (Var)} \quad (7)$$

무효전력의 단위로는 바르(Var) 또는 킬로바르(kVar)를 사용한다. 여기서 Var는 Volt Ampere Reactive의 약자이며, 이는 피상전력 중에서 부하에 전달되지 않는 전력이라는 의미이다.

식 (7)에서 $\sin \theta$ 를 무효율(Reactive Factor)이라고 한다. 전압과 전류의 위상차 θ 가 커지면(역률 $\cos \theta$ 가 작아진다.) 무효율 $\sin \theta$ 는 커지므로, 그 결과 무효전력이 커진다.

무효전력은 그림7의 (b)와 같이 부하에서 유효하게 사용되지 않고 전원과 부하 사이를 왕복하기만 하므로, 부하에서 일정 전력이 필요한 경우 무효전력이 크면, 전선의 굵기와 전원의 용량을 필요 이상으로 크게 해야 한다.

(2) 역률과 역률개선

역률은 피상 전력 중에서 유효 전력으로 사용되는 비율을 나타내는 것으로, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{역률} = \frac{\text{유효전력}(P)}{\text{피상전력}(P_a)} = \frac{VI \cos \theta}{VI} = \cos \theta \quad (8)$$

그림 8은 RLC 병렬회로를 나타낸 것이며, 전압 v 는 $v = 100 \sin \omega t \text{ (V)}$

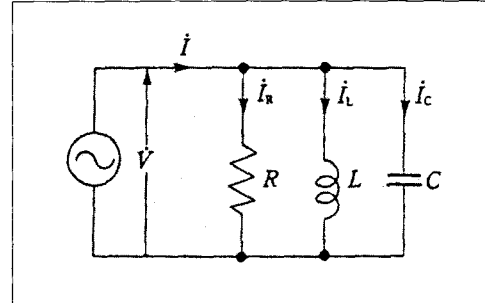
를 인가하고, 각 소자의 임피던스가 $5(\Omega)$ 으로 같다면 다음과 같이 서로 실효값은 같지만, 위상이 다른 전류 i_R, i_L, i_C 가 흐르게 된다.

$$i_R = 20 \sin \omega t \text{ (A)}$$

$$i_C = 20 \sin (\omega t + 90^\circ) \text{ (A)}$$

$$i_L = 20 \sin (\omega t - 90^\circ) \text{ (A)}$$

따라서, 저항의 역률은 1, 코일과 콘덴서의 역률은 0이



〈그림 8〉 RLC 병렬회로

되므로, 각 소자에 전달되는 전력은 각각

$$P_R = VI \cos 0^\circ = VI \text{ (W)}$$

$$P_L = VI \cos 90^\circ = 0 \text{ (W)}$$

$$P_C = VI \cos(-90^\circ) = 0 \text{ (W)}$$

가 된다. 즉, 저항에만 유효전력이 전달되고, 코일과 콘덴서에는 전혀 유효전력이 전달되지 않는다.

부하에 유효전력이 전달되는 비율을 역률 $\cos \theta$ 로부터 알 수 있는데, 부하의 리액턴스 성분이 클수록 역률이 작고, 유효전력도 작아진다.

반면에 부하의 저항 성분이 클수록 부하의 역률이 커지고, 더 큰 유효전력이 부하에 전달된다. 그러므로 역률이 낮은 부하에 일정한 전력을 전달하기 위해서는 전원의 용량을 크게 하여 더 많은 전류를 흘려야 한다.

그러나 더 많은 전류가 회로에 흐르게 되면 그에 따라 열손실이 증가하게 되고 전선도 굵어져야 하므로, 결과적으로 회로의 효율도 나빠지고 경제성도 떨어진다.

따라서 전력을 발생시켜 부하에 공급하는 송전 계통의 효율을 높이기 위해서는 부하 전류가 최소가 되도록 해야 한다.

한편, 유효전력 $P \text{ (W)}$, 무효전력 $P_r \text{ (Var)}$, 피상전력 $P_a \text{ (VA)}$ 사이에는

$$P^2 + P_r^2 = P_a^2$$

의 관계가 성립함을 알 수 있다.

이 식으로부터 일정한 유효전력을 부하에 공급하면서 피상전력을 줄이기 위해서는 무효전력을 줄여야 함을 알 수 있다. 또, 식 (5)나 (7)로부터 무효전력을 줄이기 위해서는 부하의 역률을 높여야 함을 알 수 있다. 이와 같이 부하의 역률을 1에 가깝게 높이는 것을 역률 개선이라고 한다.

대부분의 부하는 부하전류의 위상이 부하에 걸리는 전압보다 뒤진 유도성 부하이므로, 소자에 흐르는 전류의 위상이 소자에 걸리는 전압보다 앞서는 용량성 부하인 콘덴서를 부하에 첨가하여 역률을 개선한다.

3. 역률개선의 이점

(1) 변압기의 손실 경감

변압기의 손실 중 동손이 차지하는 비율은 75(%)라고 하면 동손의 저감량은 다음과 같다.

$$W_t = \left[\frac{100}{\eta} - 1 \right] \times \frac{3}{4} \left[\frac{P}{P_t} \right]^2 \times \left[1 - \frac{\cos^2 \theta_0}{\cos^2 \theta_1} \right] P_t \text{ (kW)} \quad (9)$$

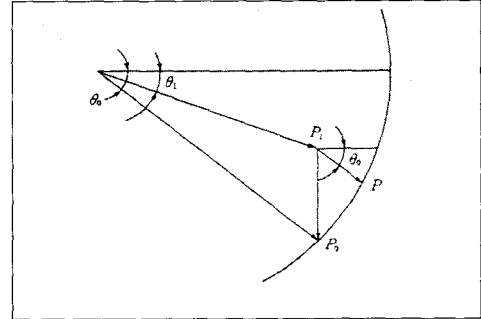
여기서, η : 변압기 효율(%)
 P : 부하용량(kW)
 P_t : 변압기 용량(kW)
 $\cos \theta_0$: 개선하기 전의 역률
 $\cos \theta_1$: 개선한 후의 역률

또한 동손의 비율이 80(%)라면 $\frac{4}{5}$ 로 하면 된다.

(2) 배전선의 손실 경감

배전선 내에서의 손실은 (선로전류)²×(선로 저항)으로 주어지며, 그 손실 저감량 W_t 는 다음식으로 구해진다.

$$W_t = \frac{P^2}{E^2} \times R \times \left[\frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right] \times 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (10)$$



〈그림 9〉 설비 여유 증가의 벡터도

여기서, P : 부하의 유효 전력(kW)
 E : 회로 전압(kV)
 R : 선로 1상분의 저항
 $\cos \theta_0$: 개선하기 전의 역률
 $\cos \theta_1$: 개선한 후의 역률

(3) 설비 용량의 여유도 증가

진상용 콘덴서 Q_c 를 설치하여 역률 $\cos \theta_0$ 에서 $\cos \theta_1$ 로 개선하였을 경우, 전원으로부터 공급되는 겉보기 전력은 P_0 에서 P_1 로 감소하게 된다. 이것을 역률 개선에 의한 부하 전류가 감소하는 결과로 나타나며, 같은 설비에서 ($P_0 - P_1$)의 설비 여력이 있는 것을 뜻한다.

이 설비 여력 P (역률 $\cos \theta_0$ 인 경우)는 다음 식으로 구해진다.

$$P_0^2 = P_1^2 + P^2 - 2P_1P \cos(180^\circ - \theta_0 + \theta_1)$$

$$P = -P_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + \sqrt{P_1^2 \cos^2(\theta_0 + \theta_1) - (P_1^2 - P_0^2)} \quad (11)$$

(4) 전압 강하율의 개선

역률을 개선하면 선로 전류가 감소하고 선로의 리액턴스분에 의한 전압 강하가 보상된다. 콘덴서 설치에 따른 전압 강하의 경감량, 즉 전압 상승값은 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta V_c = \frac{Q_c}{R_c} \times 100 \quad (\%) \quad (12)$$

여기서, Q_c : 설치하는 콘덴서 용량(kVA)

R_c : 콘덴서 설치 모선의 단락 용량(kVA)

(5) 전력 요금의 경감

전기 요금은 계약전력(kW)으로 정해지는 기본 요금과 사용 전력량(kW)으로 정해지는 전력 요금으로 구성된다.

전력 수용가의 부하 역률을 개선하면 전력회사는 설비의 합리화를 유도하기 위하여 기본요금의 역률 할인 제도를 시행하고 있다.

고압 수전의 경우 전력회사와 협정한 역률이 90%를 초과한 1%에 대하여 95%까지 기본요금의 합계 1%를 할인하고, 90%를 미달할 때는 그 미달분 1%에 대하여 기본요금 합계의 1%를 할증한다.

산정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{기본요금} &= \text{계약전력} \times \text{1kW당의 단가} \\ &\times \left(1 + \frac{90 - \text{협정역률}}{100} \right) \end{aligned}$$

4. 진상 콘덴서의 설치목적과 용량 산정방법

가. 진상 콘덴서의 설치목적

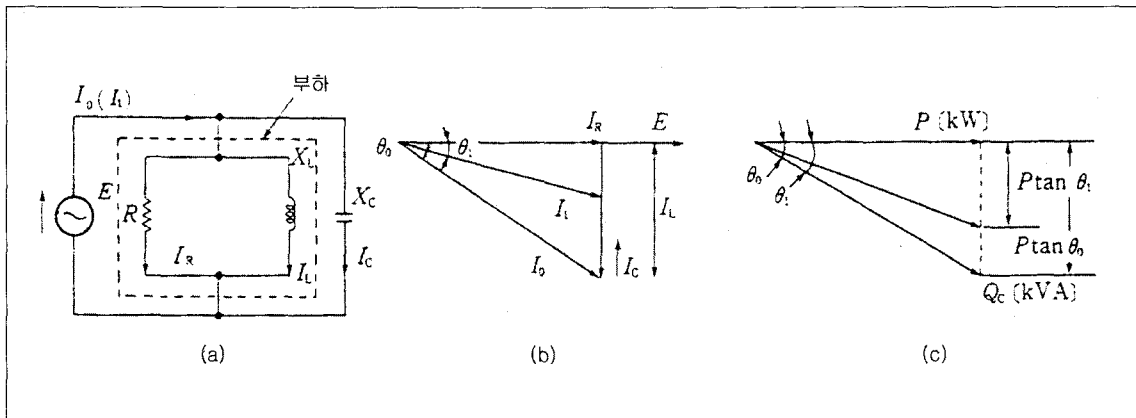
역률이 나쁘면 전기 기기나 배선의 능력을 충분히 발휘할 수 없을 뿐만 아니라, 전력손실도 많아지므로 이것을 개선할 필요가 있다. 그러므로 콘덴서에서는 앞선 전류가 흘러서 역률이 개선되므로 이것을 역률 개선용으로 응용한 것이다.

전기설비 중 비교적 역률이 나쁜 부하는 동력이며, 전 전력부하의 % 정도이므로 역률 개선은 동력 부하를 대상으로 하여도 실용상 지장이 없다.

또한 전력회사의 공급규정에 의하면 수용가는 수용장소의 전체 전기기기의 역률을 90(%)을 기준역률로 정하고 그 이상을 유지하도록 하고 있다.

나. 진상 콘덴서의 용량을 구하는 방법

전력 부하는 일반적으로 그림 10과 같이 저항 R과 유도성 리액턴스 X_L 의 조합으로 이루어져 있어 전압과 전류는 그 임피던스에 의해 $\cos \theta$ 만큼의 위상차를 나타낸



〈그림 10〉 역률 개선 분석도

전력관리

다. 이를 역률이라 한다. 저항 R 에 흐르는 전류 I_R (유효 전류)는 전압 E 와 같은 상이고, 유도성 리액턴스 X_L 에 흐르는 전류 I_L (무효 전류)는 전압 E 보다 90° 뒤진 위상차를 가지는데 벡터 합인 전류는 I_0 가 된다.

이 부하와 병렬로 진상용 콘덴서에 의한 용량성 리액턴스 X_C 를 접속하면, 진상용 콘덴서에 흐르는 전류 I_C 는 전압 E 보다 90° 앞선 위상이 되어 I_L 은 I_C 만큼 상쇄되어 겉보기 전류 I_0 가 I_1 으로 감소한다. 이 결과, 그림 (b)와 같이 역률 $\cos \theta_0$ 가 $\cos \theta_1$ 으로 된 진상용 콘덴서를 설치하기 전보다 역률이 1에 가까워진다. 이 효과를 역률 개선효과로 볼 수 있다.

그림(c)에서 콘덴서 용량 Q_C 를 구하면

$$Q_C = P(\tan \theta_0 - \tan \theta_1) \text{ (kVA)} \quad (13)$$

또는

$$Q_C = P\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_0} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_1} - 1}\right) \text{ (kVA)} \quad (14)$$

즉, 소요 콘덴서 용량(kVA) = 부하 용량(kW) ×

$$\left(\sqrt{\frac{1}{(\text{부하의 역률})^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{(\text{개선 목표 역률})^2} - 1}\right) \quad (15)$$

로 나타낼 수 있다.

위와 같이 계산식으로 구할 수 있으나 실제 설계시는 내선규정에서 정하고 있는 콘덴서 부설에 관한 기준에 의하여 구하는 것이 편리하다.

다. 내선규정에 의해 산정하는 방법

역률을 개선하려면 경제적이고 또 보수가 간단한 진상용 콘덴서를 설치하는 것이 가장 일반적이다.

(1) 저압진상용 콘덴서의 설치

역률 개선용 콘덴서는 내선규정 제340절에 준하여 개개의 부하에 설치하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 표 1과 표 2와 같이 콘덴서 부설용량 기준표를 제시하고 있

다. 저압용 부하 즉, 전동기, 용접기, 전기로 등의 부하에 직결하여 콘덴서를 설치하고, 이때 전부하의 역률 90~95%가 되도록 진상용 콘덴서를 설치한다.

〈표 1〉 단상 유도전동기의 경우

정격 출력		설치 용량 (μF)			
(kW)	(HP)	①100V	②110V	③200V	④220V
0.1	1/8	40	40	10	10
0.2	1/4	50	40	15	10
0.25	1/3	75	60	20	15
0.4	1/2	100	80	20	20
0.55	3/4	100	80	30	20
0.75	1	120	100	30	30

- (비고) 1. ①과 ③은 전기공급규정에 의한.
 2. ②와 ④는 ①을 기준으로 산출한 것으로 참고용임.
 3. 단상 60 μF 또는 80 μF 콘덴서는 생산되고 있지 아니하므로 30 μF×2, 40 μF×2 또는 1개의 75 μF나 100 μF를 사용하여야 함.

〈표 2〉 3상 유도전동기의 경우 (220V, 380V급)

정격 출력		역률 (%)	무효 전력 (kVar)	설치하는 콘덴서 용량(90%까지)			
(kW)	(HP)			200V		380V	
(kW)	(HP)	(%)	(kVar)	(μF)	(kVA)	(μF)	(kVA)
0.2	1/4	60.0	0.262	15	0.2262	-	-
0.4	1/2	66.5	0.447	20	0.3016	-	-
0.75	1	73.0	0.691	30	0.4524	-	-
1.5	2	77.0	1.230	50	0.754	10	0.544
2.2	3	79.0	1.699	75	1.131	15	0.816
3.7	5	80.0	2.767	100	1.508	20	1.088
5.5	7.5	78.5	4.330	175	2.639	50	2.720
7.5	10	79.5	5.716	200	3.016	75	4.080
11	15	80.5	8.099	300	4.524	100	5.441
15	20	81.0	10.845	400	6.032	100	5.441
22	30	82.0	15.340	500	7.54	150	8.161
30	40	82.5	20.544	800	12.064	200	10.882
37	50	83.5	24.380	900	13.572	250	13.602

- (비고1) 200V용과 380V용은 전기공급규정에 의한.
 (비고2) 콘덴서가 일부 설치되어있는 경우에는 무효전력(kVAR) 또는 용량(kVA 또는 μF) 합계에서 설치되어 있는 콘덴서의 용량(kVA 또는 μF)의 합계를 뺀 값을 설치하면 된다.

(2) 고압 진상용 콘덴서의 설치

고압으로 수전하고 있는 수용가에서는 역률 개선을 할 때는 저압과 같이 개개의 부하에 설치하지 않고 수전실 또는 회로마다 정리하여 고압 콘덴서를 설치하면 설비비를 줄일 수 있다.

이때 진상용 콘덴서의 소요용량은 평균 사용전력과 평균 역률을 구하고 개선목표 역률을 정하여 다음 식으로 결정한다.

$$\text{콘덴서 용량(kVA)} = \text{부하} \times \text{계수}$$

단, 부하가 kW일 때는 표 3의 계수

부하가 kVA일 때는 표 4의 계수

<계산사례 1>

부하 180kW로 역률 60%일 때 이를 90%의 역률로 개선하고자 할 때의 진상용 콘덴서의 용량을 구한다. 이때의 콘덴서 결정계수는 표 3에서 0.85이므로 다음 식과 같이 계산한다.

<표 3> 진상용 콘덴서 용량 결정 계수표
(kW 부하를 기준으로 하는 경우(콘덴서 용량 kVA))

최초의 역률 (%)	개선후의 역률 (%)			최초의 역률 (%)	개선후의 역률 (%)		
	95	90	85		95	90	85
30	2.85	2.69	2.56	64	0.87	0.72	0.58
32	2.63	2.48	2.34	66	0.81	0.65	0.52
34	2.44	2.28	2.15	68	0.75	0.59	0.46
36	2.26	2.11	1.97	70	0.69	0.54	0.40
38	2.11	1.95	1.81	72	0.64	0.48	0.34
40	1.96	1.81	1.67	74	0.58	0.42	0.29
42	1.83	1.68	1.54	76	0.53	0.37	0.24
44	1.71	1.56	1.42	78	0.47	0.32	0.18
46	1.60	1.44	1.31	80	0.42	0.27	0.13
48	1.50	1.34	1.21	82	0.37	0.21	0.08
50	1.40	1.25	1.11	84	0.32	0.16	0.03
52	1.31	1.16	1.02	86	0.27	0.11	-
54	1.23	1.07	0.94	88	0.21	0.06	-
56	1.15	0.99	0.86	90	0.16	-	-
68	1.08	0.92	0.78	92	0.10	-	-
60	1.00	0.85	0.71	94	0.03	-	-
62	0.94	0.78	0.65				

$$180(\text{kW}) \times 0.85 = 153(\text{kVA})$$

<계산사례 2>

부하 300kVA로 역률이 60%일 때 이를 90%의 역률로 개선하고자 할 때 진상용 콘덴서의 용량을 구한다. 이때의 콘덴서 결정계수는 표 4에서 0.51이므로 다음 식과 같이 계산한다.

$$300(\text{kVA}) \times 0.51 = 153(\text{kVA})$$

<표 4> 진상용 콘덴서 용량 결정계수표
(kVA 부하를 기준으로 하는 경우)

최초의 역률 (%)	개선후의 역률 (%)			최초의 역률 (%)	개선후의 역률 (%)		
	95	90	85		95	90	85
30	0.86	0.81	0.77	63	0.56	0.46	0.37
32	0.84	0.97	0.75	66	0.54	0.43	0.34
34	0.83	0.78	0.73	68	0.51	0.40	0.31
36	0.82	0.76	0.71	70	0.49	0.38	0.28
38	0.80	0.74	0.69	72	0.46	0.35	0.25
40	0.79	0.72	0.67	74	0.43	0.32	0.22
42	0.77	0.71	0.65	76	0.40	0.28	0.18
44	0.75	0.69	0.63	78	0.37	0.25	0.14
46	0.74	0.67	0.60	80	0.34	0.21	0.10
48	0.72	0.65	0.58	82	0.30	0.18	0.07
50	0.70	0.62	0.56	84	0.27	0.14	0.03
52	0.68	0.60	0.53	86	0.23	0.10	-
54	0.66	0.58	0.51	88	0.19	0.05	-
56	0.64	0.56	0.48	90	0.14	-	-
58	0.62	0.53	0.46	92	0.09	-	-
60	0.60	0.51	0.43	94	0.03	-	-
62	0.58	0.49	0.40				

비고 : 콘덴서 용량을 정하기 위하여 부하용량이 kW로 표시되고 있을 때는 표3을, kVA로 표시되어 있을 때는 표4를 사용하고, 부하의 역률(콘덴서 취부 전역률)과 개선후의 역률로 정하는 수치를 부하량에 곱하면 콘덴서 용량이 산출된다.

(3) 수전 변압기 용량의 경우

전력회사에서도 수전 변압기의 무효전력을 보상하기 위한 콘덴서 용량을 확보하도록 규정하고 있으며, 콘덴서 용량 산정기준은 표 5와 같다.

〈표 5〉 수전 변압기 용량의 경우

변압기 용량(kVA)	콘덴서 용량(kVA)
500(kVA) 이하	변압기 용량 × 5(%)로 콘덴서 용량 결정
500~2,000(kVA)의 경우	변압기 용량 × 4(%)로 콘덴서 용량 결정
2,000(kVA) 이상	변압기 용량 × 3(%)로 콘덴서 용량 결정

5. 진상용 콘덴서의 설치 장소와 효과

진상용 콘덴서를 접속할 곳은 여러 가지를 생각할 수 있으나 가장 적합한 장소의 선정 방법은 수용가의 구내 계통 및 부하 조건에 따라 검토가 개별적으로 요구되며, 효과, 보수, 점검, 경제적인 선정 요소가 다양하여 각각 장단점이 있기 때문이다.

가. 수전 모선단에 중앙 집중으로 설치하는 방법

그림 11의 (a)와 같이 수전 모선단 중앙에 설치할 경우 관리가 용이하고, 무효전력에 신속 대처할 수 있어 전력 요금 등에 대한 절감효과를 가져올 수 있으나, 선로의 개

선 효과는 기대할 수 없으므로 부하 분산 설치와 병행하여 설치하는 것이 바람직하다.

나. 부하와 중앙에 분산 배치하여 설치하는 방법

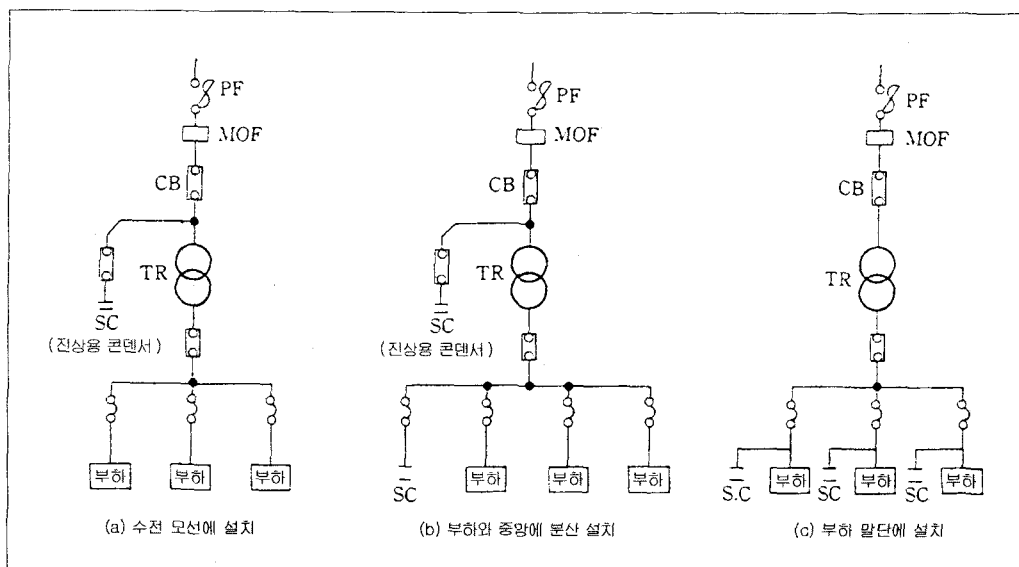
그림11의 (b)와 같이 수전 모선단 중앙에 부하와 병행하여 설치하는 방법으로 중앙 집중 설치 방법보다 개선 효과가 크다.

다. 부하 말단에 분산하여 설치하는 방법

콘덴서 설치에 따른 효과가 배전선을 포함한 전원측의 경로를 통해 나타나므로 각각의 부하에 그림11의 (c)와 같이 개별적으로 설치하는 방식이 가장 효과가 크고, 콘덴서 제어가 간편하나 부하에 각각 부설해야 하므로 경제적인 부담이 크다.

6. 진상용 콘덴서의 자동 제어방식

진상용 콘덴서를 설치하여 항상 높은 역률을 유지하고



〈그림 11〉 콘덴서 설치 예

전기설비를 효율적으로 이용하려면, 부하의 변동에 맞춰 필요한 진상 용량만 공급하도록 콘덴서를 개폐 제어해야 한다.

수동 조작으로 제어하기 위해서는 항상 계기를 감시해야 하기 때문에 비현실적인 경우가 많다. 또한 전원측과 보상으로 인한 손실 증대를 막기 위해 공장 설비에는 콘덴서 자동 제어방식이 많이 있으며, 건축 전기설비의 경우도 건물의 용도와 규모에 따라 적절한 제어 방식이 적용되고 있다.

콘덴서 제어방식은 다음과 같은 방식이 있다.

- (가) 특정 부하 개폐 신호에 의한 제어
- (나) 프로그램에 의한 제어
- (다) 수전점 무효전력에 의한 제어
- (라) 모선 전압에 의한 제어
- (마) 부하 전류에 의한 제어
- (바) 수전점 역률에 의한 제어

상기와 같은 자동 제어방식별 특징을 표 6에서 비교한다.

7. 콘덴서의 회로의 부속 기기

가. 방전 코일(DC ; Discharging Coil)

콘덴서를 회로에서 개방하였을 때 전하가 잔류함으로써 일어나는 위험의 방지와 재투입할 때 콘덴서에 걸리는 과전압을 방지하기 위하여 방전장치가 사용된다.

방전장치에는 방전코일과 방전저항의 2종류가 있으며, 보통 대용량은 방전코일이 사용되고, 소용량에는 방전저항이 많이 사용된다.

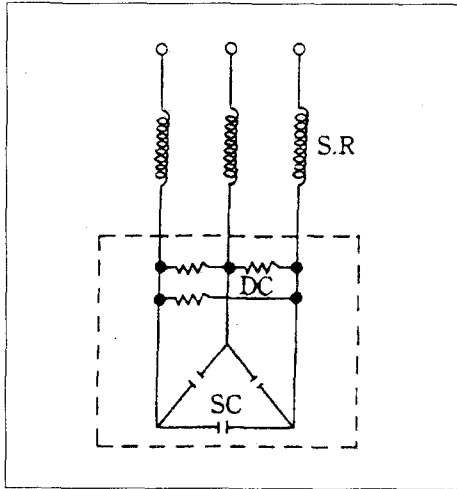
방전장치는 콘덴서 용량(kVA)에 대하여 고압의 경우 개폐 후 5초 이내에 50(V) 이하로 하고, 저압의 경우는 3분에 75(V) 이하로 방전시킬 수 있는 성능을 갖추어야

〈표 6〉 진상용 콘덴서의 자동제어 방식의 종류와 특징

회 로 도	자동 제어 방식	적 용	특 징
	(1) 특정부하의 개폐 신호에 의한 제어	변동하는 특정 부하 이외의 부하 무효전력이 거의 일정한 곳	개폐기의 접점만으로 간단히 제어할 수 있어 가장 설치비가 적다.
	(2) 프로그램에 의한 제어	하루의 부하 변동이 거의 없는 곳	(1) 다음으로 설치비가 적게 든다. 타이머 조정과 조합 등으로 기능의 변환이 가능하다.
	(3) 수전점 무효전력에 의한 제어	모든 변동 부하	부하 변동의 종류를 가리지 않고 적용 가능하며, 순간적인 부하 변동에만 주의하면 된다.
	(4) 모선전압 제어에 의한 제어	전원 임피던스가 크고 전압 변동이 큰 계통	역률 개선보다도 전압강하 억제를 목적으로 한 것이며, 전력 회사에서 많이 채용하는 방식이다.
	(5) 부하전류에 의한 제어	전류의 크기와 무효전력의 관계가 일정한 곳	부하의 CT 2차 전류만으로 적용이 가능하여 조작이 간단하다.
	(6) 수전점 역률에 의한 제어	모든 변동 부하	같은 역률이라도 부하의 크기에 따라 무효전력이 다르므로, 일반적인 수용가에선 채용되고 있지 않다.

비고 1. 콘덴서 설치에 따른 효과는 그 설치 위치에서 전원측에 나타나므로 수용가 측에서의 효과는 부하 말단에 설치할수록 좋아지므로, 자동 제어 방식을 결정을 복합적으로 결정되어야 한다.

비고 2. 콘덴서 자동 제어 방식은 현재 외국 제품이 많이 사용되고 있으므로, 설계시 운용 요원의 입장에서 적용되어야 할 것이다.



〈그림 12〉 방전코일 및 직렬리액터의 설치

한다. 따라서, 콘덴서가 부하와 직결하여 똑같이 개폐될 경우에는 부하의 회로를 통하여 방전할 수 있으므로 방전 장치가 불필요하다.

나. 직렬 리액터

역률 개선용으로 콘덴서를 사용하면 회로의 전압이나 전류파형의 왜곡을 확대하는 수가 있고 때로는 기본파 이상의 고조파를 발생하는 수가 있다. 이러한 고조파의 발생으로 나타나는 문제점을 보완하기 위하여 콘덴서용 직렬 리액터(SR : Series Reactor)를 설치 운용한다.

직렬 리액터 용량은 콘덴서 용량의 6(%) 정도이고, 대체로 뱅크 용량이 500(kVA) 이상인 경우에 설치하고 있다.

8. 합리화 운용사례 기술 분석

가. 건축물 부문

(1) A 호텔

(가) 설비 개요 및 문제점

- ① 역률개선용 콘덴서는 본관동에는 3.3kV 모선측에 냉동기 보상용으로 275kVA, 일반전력 보상용으로 275kVA가 설치되어 있고, 별관동에도 3.3kV 모선측에 냉동기 보상용으로 200kVA, 일반전력 보상용으로 300kVA가 설치되어 있으며, 수변전실의 고압 모선에 집중 설비되어 있고, 임의로 조작이 가능하도록 되어 있다. 이로 인하여 하절기 냉방부하 운전 시에는 진상 운전상태를 유지하는 것으로 나타났다.
- ② 표 7은 각 변압기별 부하에 따른 역률값을 나타낸 것이며, 표에서 보는 바와 같이 수전단측 역률은 고압 모선에 연결된 보상 콘덴서에 의해서 95% 이상을 유지하고 있으나, 부하용 주변압기(2단 강압식 뱅크구성)는 88%이고, 저압 변압기 2차측은 80~70% 미만으로 유지되고 있다.
- ③ 따라서, 각 저압측 부하의 역률은 대단히 저하된 상태로 역률저하에 따른 선로전류의 증가로 발생하는 선로 손실과 변압기 손실의 증가를 수반하는 것으로 나타났다.

〈표 7〉 각 변압기별 부하에 따른 역률값

구 분	변압기명	최대값 (kW)	역률 (%)	최소 (kW)	역률 (%)	비고
본관동	Main	1,575	96	762	99	
	MT-1	1,251	88.8	586	91	수전용
	MT-2	860	97	440	-80	수전용
	SHV-7	285	99.4	163	90.7	Main이 최대값일 때
	HV-4	367	95.3	150	90.5	
	HV-5	365	76	136	66	
	HV-6	296	95	56	99	
	HV-7	198	93	108	88	
별관동	HV-8	159	82	69	72	
	SHV-7	308	100	163	91	
	UHV-3	305	100	159	88	
	HV-5	76	71	62	69	
	HV-6	45	65	25	57	

〈표 8〉 역률 95 %를 기준으로 하였을 때 현재 역률 대비 손실량

구 분	변압기명	부하 (kW)	역률 (%)	변압기손실 (kW)	케이블		선로손실 (kW)
					전류용량	단면적×조수	
본관동	MT-1(2,000kVA)	1,251	89	0.85			
	HV-5(700kVA)	365	76	1.17	850	325mm ² × 2	3×0.52 ⇒ 3.12
	HV-7(300kVA)	116	87	0.12	370	250mm ²	3×0.46 ⇒ 1.38
	HV-8(500kVA)	129	80	0.18	1,160	250mm ² × 3	3×0.15 ⇒ 1.35
	S/P(300kVA)	170	73	0.96	365	250mm ²	3×0.36 ⇒ 1.08
별관동	HV-5(250kVA)	76	71	0.25	310	200mm ²	3×0.103 ⇒ 0.3
	HV-6(500kVA)	45	65	0.06	610	200mm ² × 2	3×0.103 ⇒ 0.16
	S/P(250kVA)	130	73	0.63	304	200mm ²	3×0.103 ⇒ 0.3

주 : 1) 변압기 손실 증가분

$$kW = [(P/P_{f1} \times P_{\theta})^2 - (P/P_{f2} \times P_{\theta})^2] \times W_c$$

여기서, P : 전력(kW), P_{f1} : 보상전 역률, P_{f2} : 보상후 역률, P_θ : 변압기 용량, W_c : 변압기 동손

2) 선로손실 증가분은 선로를 변압기 용량의 80% 용량 포설시의 케이블 굵기 및 기준거리 100m로 하였을 때의 역률에 따른 전류 변화에 의한 손실차임.

④ 표 8은 역률 95%를 기준으로 하였을 때 현재 역률 대비 손실(변압기 및 선로)을 계산한 것이며, 역률 개선이 요구되고 있다.

(나) 개선 방법

저압 콘덴서를 각 기계실 등의 MCC반에 부하개폐기와 병렬로 설치하여 부하와 동시에 ON/OFF 되도록 하여 선로 손실 및 변압기 손실을 절감한다.

(2) B 백화점

(가) 설비 개요 및 문제점

수전단측의 역률은 95%로 유지하고 있으나, 진상용 콘덴서는 중앙 집중방식으로 구성되어 있다. 따라서, 부하측의 역률 저하로 전류가 증가하여 전선의 여유율이 낮아지고, 선전류가 높아짐으로써 변압기 부하손 및 선로 손실이 발생된다.

(나) 개선 방법

부하측의 역률이 C-11은 51%이고, CP-14는 76%로 조사되었으며, 적정 용량의 역률보상용 콘덴서를 부하측

에 시설하여 부하측의 역률을 95% 이상으로 유지한다.

(3) C 빌딩

(가) 설비 개요 및 문제점

수전단측의 역률은 99%를 유지하고 있으나, 진상용 콘덴서는 중앙 집중방식으로 구성되어 있다. 따라서, 말단부하측(옥탑 동력)의 역률이 40% 정도를 유지하고 있어 전력손실이 야기된다.

(나) 개선 방법

말단부하측의 역률이 매우 낮으므로 적정 용량의 역률 보상용 콘덴서를 부하측에 시설하여 부하측의 역률을 95% 이상으로 유지한다.

나. 산업시설 부문

(1) D 주철(금속업)

(가) 설비 개요 및 문제점

수전단의 역률은 평균 93%를 유지하고 있으며, 역률

전력관리

관리를 변전실 6.6kV 계통에서 집중관리하고 있어 배전 역률이 최하 47%의 낮은 상태를 유지하고 있다. 이와 같이 고압 콘덴서로 집중관리시 안전관리에 문제점이 많고, 90% 이상의 역률 보상이 어렵고 보수율이 높아 유지관리비가 커지는 단점이 있다.

(나) 개선 방법

현재의 6.6kV 계통의 콘덴서군을 사용하지 않고, 각 배전변압기의 2차측 및 각종 전동기측에 해당 부하용량에 적합한 콘덴서를 설치한다.

부하측 설비의 변동이 클 경우에는 부하측 개폐기 2차측에 측정 역률에 적합한 콘덴서를 설치하고, 부족한 역률 보상을 위해 변압기 2차측에서 고정 역률을 보상하거나 자동역률보상장치를 이용한다.

또 다른 방안으로는 변압기 2차측 및 부하에 콘덴서를 설치후 부족분에 한해서만 변압기 1차측에서 현재의 자동역률보상장치를 이용하여 소량의 역률 보상을 하도록 한다. 특히 고압전동기는 전력계측장비를 구비하여 현재 운전역률을 파악후 필요한 콘덴서용량을 선정하여 역률을 95% 이상 향상시킨다.

이와 같이 역률을 부하측에서 분산관리하는 것이 바람직하며, 배전선로 및 배전변압기의 손실 감소, 변압기 부하율 감소로 변압기 여유율이 향상된다.

(다) 기대 효과 계산

1) 계산 기준

- ① 역률 95% 이상 유지
- ② 역률 95% 향상시 변압기 동손실 감소전력 : 24.1kW
- ③ 야간전력 사용량 감소에 따라 여유율 80% 적용
- ④ 월 전기요금은 1997년 4월 적용한 28,091,130원/월

2) 연간 절감량

$$:(\text{변압기 동손실 감소량}) \times (\text{여유율}) \times (\text{연간 적용 시간})$$

〈표 9〉 산업체별 전기설비 현황과 역률관리 현황

구 분	E 기업	F 제강	G 주공	H 금속	I 강업
수전 용량(kVA)	10,200	30,000	10,950	9,000	6,000
총변압기시설용량(kVA)	21,150	77,800	17,030	16,850	15,650
연평균역률(%)	95	90	97	97	92
절감량(MWh/년)		551.9			108.3
최대전력 절감량(kW)		63.0			13.7

$$= 24.1\text{kW} \times 0.8 \times 24\text{시간/일} \times 300\text{일/년}$$

$$= 138.816(\text{kWh/년})$$

3) 연간 절감액

$$:[(\text{월 전기요금}) \times (\text{역률 보상 요금 혜택률}) \times (12\text{월})] + [(\text{연간 절감량}) \times (\text{전력단가})]$$

$$=[28,091,130\text{원/월} \times 0.02 \times 12\text{월}] + [138,816\text{kWh/년} \times 47.24\text{원/kWh}]$$

$$= 13,300(\text{천원/년})$$

4) 투자비 : 30,000 천원(개소당 10만원씩 약 300개소)

5) 투자비 회수기간 : 2.3년

6) 최대전력 절감량 : 24.1kW

(2) 금속업종의 5개 산업체

표 9는 5개 산업체의 전기설비 현황과 역률 관리 현황을 나타낸 것이며, F 제강과 I 강업의 경우 역률이 90%, 92%로 조사되었고, 역률 보상을 위한 대책이 요구된다.

F 제강의 경우 역률을 95%로 향상할 경우 최대전력 절감량이 63kW, 연간 절감량이 551.9kWh/년 으로 계산되며, I 강업의 경우에는 역률을 95%로 향상할 경우 최대전력 절감량이 13.7kW, 연간 절감량이 108.3kWh/년으로 계산된다.