

전력용 콘덴서는 무효전력을 보상하여 역률을 개선하기 위해 전력계통에 없어서는 안 될 기기이다. 콘덴서는 본래 절연신뢰성이 높은 기기인데, 고조파 발생부하로 사이리스터 응용기기가 광범위하고 다양하게 사용됨에 따라 콘덴서 설치와 운용을 잘못하면 전력계통에 과대한 고조파 왜곡을 발생시켜, 다른 기기에 영향을 줄 뿐 아니라, 콘덴서 자체도 성능열화 또는 과열손상을 초래한다. 따라서 고조파 발생원을 갖는 계통에서는 콘덴서 설치·운용에 있어서 충분한 검토가 필요하다. 본문의 구성은 전력계통에서 이해하기 어려운 고조파 관련 기술을 학습한 후, 무효전력제어와 역률 개선 기술을 해설하고자 한다.

Photovoltaic Power Generating System

전력계통 고조파 대책과 역률개선 기술

글 _ 이성우 | 파워세븐엔지니어링 대표 · 임종필 | 파워세븐엔지니어링 차장
박선봉 | 롯데건설 부장 · 최진성 | (주)동양티피티 이사

5.4 콘덴서 설치 위치

보통 역률은 전반적으로 90~95%정도로 유지할 수 있도록 진상 콘덴서를 계획하는데, 그 후의 부하증가에 따라 정기적으로 역률을 관리할 필요가 있다. 이미 학습한 바와 같이 보통 역률의 계산은 다음 식으로 계산한다.

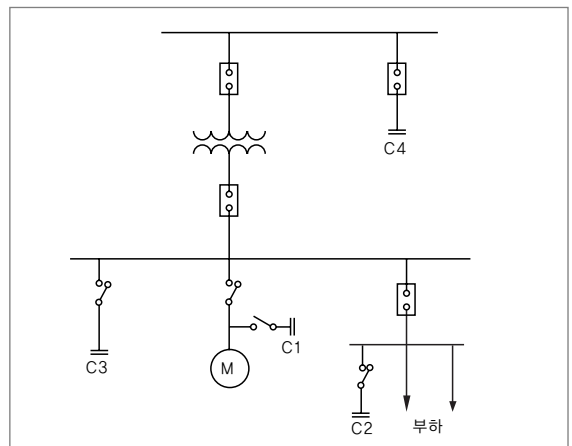
$$\cos\theta = \frac{kW}{kVA} = \frac{kW}{\sqrt{3} \times kV \times A} = \frac{kW}{\sqrt{(kW)^2 + (kVAR)^2}} \dots (28)$$

역률은 공장 가동률의 영향을 받으며 무효전력은 설비에 따라 거의 일정하고, 유효전력은 부하의 증가에 비례한다. 따라서 조업도가 낮으면 역률은 나빠지게 된다.

일반적으로 역률개선의 방법은 전력용 콘덴서 또는 동기기로 사용하여 무효전력을 공급함으로써 개선하게 된다.

동기기의 무효전력출력은 역률이 낮은 기기를 설치할수록 공급 가능한 진상무효전력이 커지고, 여자와 부하에 따라 변한다. 동기전동기에 의한 역률개선방식은 구동되는 기계의 특질에 의해 결정되는 경우가 아니면, 대형전동기에서 유도전동기와 콘덴서의 조합을 채용하는 경우와, 동기전동기에 무효분용량을 지니게 하는 경우를 경제적 비교에 의해 선택할 필요가 있다.

그러나 대개는 보전이 쉽고 비용도 적게 드는 유도전동기와 콘덴서의 조합을 사용하는 경우가 일반적이다. 콘덴서의 설치 위치는 그림 13과 같이 고려할 수 있으나 가장 효과가 있는 것은 부하에 가깝게 설치하는 C₁이고, 다음이 C₂, C₃, C₄의 순서가 된다. 특히 역률이 나쁜 부하 또는 배전선로가 길어서 선로 손실이 크고, 전압강하도 큰 부하에 대해서는 부하단에 설치하여 손실경감, 전압강하의 개선을 도모하는 것이 바람직하다.



【그림 13】 콘덴서 설치 위치

즉 진상용 콘덴서를 설치하는 곳은 여러 가지를 생각할 수 있으나, 가장 적합한 장소의 획일적인 선정방법은 유감스럽게도 없다고 생각된다. 따라서 콘덴서의 설치 위치를 선정할 때는 비용, 전력손실, 역률, 케이블 충전용량, 제어, 유지관리, 고조파 영향 등, 그 선정요소가 다양하여 각기 일장일단을 가지고 있기 때문에 종합적으로 검토하여 정하여야 한다. 특히 대용량 전력계통에서 역률변동이 매우 큰 경우에는 콘덴서의 개폐 또는 자가발전설비가 있을 때는 동기발전기의 여자조정에 의한 무효전력의 조정이 필요하다. 표 9는 콘덴서 일괄설치와 분산설치를 비교하여 나타낸 것이다.

【표 9】 콘덴서 일괄설치와 분산설치의 비교

항 목	일괄설치	분산설치
기본요금 저감효과	동등	동등
콘덴서 용량	최소	일반적으로 최대
변압기·배전선의 손실저감효과	소	대
전압강하 경감효과	소	대
보수점검·유지관리	간단	번잡
초기 투자비용	소	대체로 큼 (저압인 경우 특히 큼)

6. 변동 무효전력의 제어

전압변동에 영향을 주는 무효전력을 줄이고 $X_s \cdot \Delta Q$ 의 값을 작게 만드는 것이다. 여기에는 동기조상기, 병렬콘덴서, 분포리액터가 사용된다.

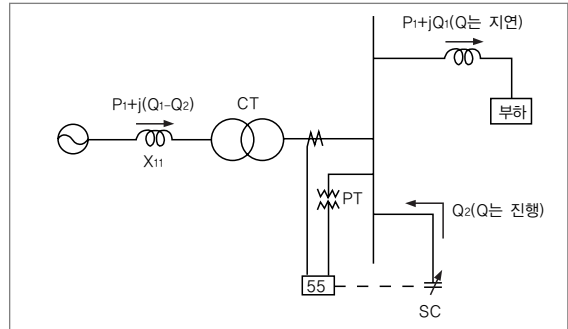
자가 발전설비를 갖고 있어서 전력계통과 상시 병렬운전되는 경우에는 발전기를 동기조상기와 동일하게 생각하여 운전역률을 부하에 따라 변화시켜 발전기에서 무효전력을 공급시키는 수도 있다. 또한 부하에 동기전동기가 여러 대 있으면 동기전동기를 진상 운전시켜 무효전력을 보상하는 방법도 있다.

최근에는 싸이리스터 변환장치의 보급으로 싸이리스터를 이용한 무효전력 보상장치가 많이 이용되고 있다. 다음은 콘덴서를 이용한 무효전력보상에 대한 대표적인 방식에 대하여 알아본다.

1) 병렬콘덴서의 점접개폐제어

이 방법은 전력용 콘덴서의 진행전류로 부하의 지연전류를 보상하여 무효전력을 감소시킴으로써 목적을 달성한다. 이 방식은 계통에 필요한 최대용량을 수 백크로 분할해서 설치하여 그림 14와 같이 콘덴서 뱅크의 투입과 트립을 역률조정 계전기

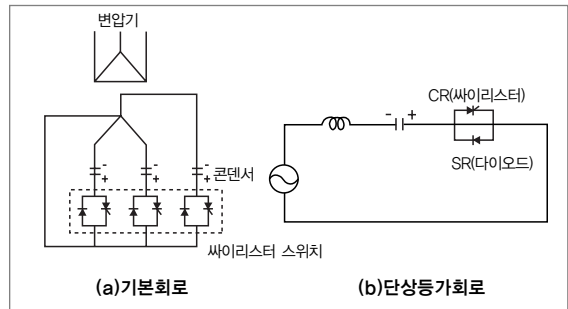
와 연동시켜 자동적으로 제어할 수 있게 함으로써 부하변동에 따른 상시 전압변동을 억제할 수가 있다.



【그림 14】 전력용 콘덴서에 의한 무효전력조정

2) 병렬콘덴서의 싸이리스터 개폐제어방식

그림 15는 변압기, 콘덴서 및 싸이리스터와 다이오드를 역병렬로 접속한 싸이리스터 스위치로 구성되어 있다.

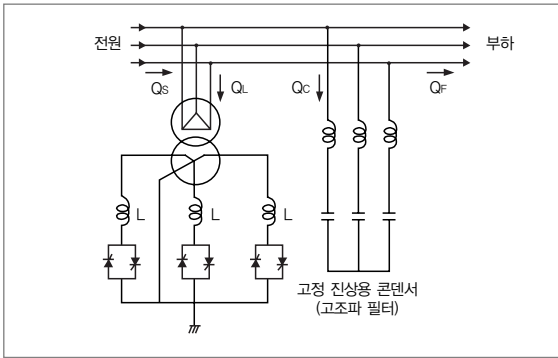


【그림 15】 싸이리스터 제어방식

싸이리스터식 플리커 방지장치는 대상으로 하는 모선의 전압 변동 또는 대상으로 하는 부하의 무효전력을 검출하는 속응성 있는 검출회로에 의해 싸이리스터 위치의 점호를 제어함으로써 장점을 발휘할 수 있다.

3) 리액터 위상제어방식

그림 16 방식은 싸이리스터 이용률, 고조파 발생량, 속응성, 불평형 부하에 의한 적용성 등의 점에서 다른 리액터 위상제어 방식에 비해서 우수하다. 이 방식은 고정 진상콘덴서와 가변 리액터의 병렬회로로 구성되고, 부하의 무효전력에 응동하여 지상무효전력을 연속적으로 조정하여 보상장치 전체로서는 진상무효전력을 조정하는 것이다.



【그림 16】 리액터 위상제어방식

즉 부하의 무효전력 Q_F (보통 지상무효전력)가 증대한 경우에는 가변리액터가 취하는 Q_L 을 감소시키고, Q_L 가 감소했을 때는 Q_L 을 증대시켜 부하의 무효전력 여하에 관계없이,

$$Q_F + Q_L \approx \text{일정}$$

이 되도록 을 제어함으로써 계통의 무효전력 Q_S 를

$$Q_S = Q_F + Q_L - Q_C \approx \text{일정}$$

이 되도록 하는 것이다. 그러므로 계통의 전압변동은

$$\Delta V \approx Q_S \cdot X_S \text{ 일정}$$

이 되어 전압 플리커는 억제된다.

아크로인 경우처럼, 각 상이 따로 위상 제어되는 때는 제 3, 9, ... 등의 3의 배수 고조파도 섞이지만, 압연기용인 경우처럼 3상 대칭제어 될 때는 변압기의 Δ 결선 때문에 계통에는 3의 배수 고조파는 거의 흐르지 않고 제 5, 7, 11, 13, ... 등의 고조파뿐이다. 이런 고조파를 억제하기 위해 고정 진상콘덴서에 각 차 고조파와 동조하는 직렬리액터를 설치하여 필터작용을 겸하게 하는 것이 보통이다.

7. 역률개선의 효과

플랜트나 빌딩의 부하는 대부분이 지연역률이므로 부하에 소비되는 전력에너지(유효전력) 이외에 무효전력을 공급할 필요가 있고, 무효전력을 공급하기 위해서 전력 콘덴서를 병렬로 설치하면 회로의 역률개선 효과가 나타난다. 이미 언급한 바와 같이 설비용량의 증가, 전압강하의 감소, 전력손실의 감소, 전력요금의 할인 효과에 대하여 설명한다.

1) 설비용량의 증가

콘덴서는 무효전력의 공급원이므로 부하가 요구하는 무효전

력 등, 배전선의 무효전력, 변압기나 전동기의 여자무효전력을 보상하고 계통의 무효전력을 감소시킨다. 그 결과 배전계통의 전류가 감소하여 그 분량만큼 설비의 전력공급의 증가를 기대할 수 있다. **예제 8**를 참고한다.

【예제 8】 설비의 송전용량 $T_1=5000\text{kVA}$ 가 있을 때, 공급 가능한 용량은 부하역률 80%에서 4000kW까지이다. 여기서 95%로 역률개선을 하면 역률 80%의 부하증가는 몇 kW까지 가능한가. 또 필요한 콘덴서의 용량은 몇 kVA인가.

【해설】 부하의 증가량은,

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \text{ 에서 증가용량 } \Delta P = P_2 - P_1 \text{ 이므로 다음과 같}$$

이 정리된다.

$$\therefore \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} - 1$$

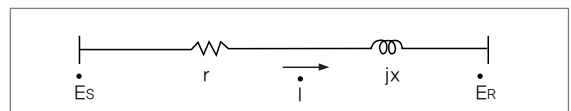
따라서 $\Delta P = P_1 \left(\frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} - 1 \right) = 4000 \times \left(\frac{0.95}{0.8} - 1 \right) = 750[\text{kW}]$ 가 된다.

필요한 콘덴서의 용량은,

$$Q_C = T(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) = 5000 \times (0.6 - 0.31) = 1400[\text{kVA}] \text{ 가 된다.}$$

2) 전압강하의 감소

배전선 및 변압기는 무효전류가 흐르면 전압강하가 증가하게 되는데, 역률개선에 의해 무효전류가 감소하므로 전압강하를 억제하는데 도움이 된다.



【그림 17】 배전선로의 등가회로

배전선로를 그림 17의 등가회로로 나타낼 때, 수전단의 전압강하는 수식(29)와 같이 표현된다.

$$\Delta E = E_S - E_R = I(r \cos\theta - x \sin\theta) \dots\dots\dots (29)$$

【예제 9】 3상 3선식 6600V 배전선에서 2000kW, 역률 80%의 전력을 소비하고 있다. 배전선의 임피던스 $Z=0.16+j0.38\Omega/\text{km}$, 거리 3.5km 라 한다. 이 때의 수전단의 전압강하를 구하라.

【해설】 고압 배전선의 전압강하를 구하는 방법은 표 10의 전기공급방식에 의한 계수를 적용해서 계산할 수 있다. 수식은,

$$\therefore \Delta E = Kw(r\cos\theta - x\sin\theta)IL \text{ 이므로,}$$

$$\Delta E = \sqrt{3} (0.16 \times 0.8 + 0.38 \times 0.6) \times 218.7 \times 3.5 = 472[V] \text{이다.}$$

【표 10】 전기공급방식에 의한 계수

전 기 방 식	Kw
단상 또는 직류 2선식	2
단상 또는 직류 3선식, 3상 4선식	1
3상 3선식	$\sqrt{3}$

3) 전력손실의 감소

배전선 및 변압기에 전류가 흐르면 $P_L = I^2 r$ 의 손실이 생기는데 역률개선에 의해 무효전류가 감소하므로 전력손실이 감소한다. 개선 전·후의 역률을 $\cos\theta_1, \cos\theta_2$ 라고 하고, 선전류를 I_1, I_2 라 하면, 손실의 감소율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K = [1 - \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}]^2 \times 100[\%] \quad \dots\dots (30)$$

【예제 10】 [예제9]에서 역률을 95%로 개선하였다면, 손실의 감소율과 개선전의 손실을 구하라.

【해설】 손실의 감소율 K는,

$$K = [1 - \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1}]^2 \times 100$$

$$= [1 - \frac{0.8}{0.95}]^2 \times 100 = 29[\%] \text{가 된다.}$$

역률개선 전의 손실 P_L 은,

$$P_L = I^2 r = 218.7^2 \times (0.16 \times 3.5) = 26.8[\text{kW}] \text{이며, 3상의 손실은 } 80[\text{kW}] \text{의 손실이 생긴다는 것을 알 수 있다.}$$

4) 전력요금의 저감

전기요금은 계약전력으로 정해지는 기본요금[kW]과, 사용전 전력량[kWh]으로 정해지는 전력요금으로 구성된다. 부하의 역률을 개선하면 부하전류가 감소하기 때문에, 배전선·변압기 등의 손실이 저감되어 설비의 합리화를 꾀할 수 있기 때문에 전력회사에서는 전기요금을 할인하는 제도를 마련하고 있다.

8. 맺음말

전력계통에서 무효전력제어는 전력의 흐름(유효전력, 무효전력, 역률, 전압)에 중요한 역할을 하는 요소이다. 계통 규모에 따라서 다소 차이는 있겠으나 대용량 설비는 물론, 소용량의 설비라고 하더라도 그 중요성을 다시 한번 언급하고 싶다.

- (1) 수전점 역률은 95% 이상인가?
- (2) 역률이 나쁜 회로는 없는가?
- (3) 콘덴서 균용량은 적당한가? (고정군과 가변군)
- (4) 접속장소는 적당한가?
- (5) 자동제어는 하고 있는가? (가변군)
- (6) 어떤 제어방식인가?
- (7) 개폐기 외에 구성기기는 적당한가?

이상과 같이, 콘덴서 운용과 역률개선 기술은 과거와는 다르게 어려운 기술이 되고 있다. 무엇보다도 콘덴서에 영향을 주는 요소 중에 하나로 고조파 전류의 영향이 증대되고 있으며, 이로 인하여 콘덴서 수명단축은 물론 변압기 소손 사고를 경험하는 등 전력계통 공진에 의한 피해가 커지고 있기 때문이다. 전력계통의 신뢰성과 안정적인 전원공급을 위해서 반듯이 학습해야할 분야이다.

이와 관련하여 다소 부족한 내용이지만 학과 과정이나 실무를 수행하면서 체계적으로 접근하기 어려웠던 내용에 대하여 소개하였으며, 설계·감리·안전관리·진단 분야의 전력기술인들에게 조금이나마 도움이 되길 기대합니다.



마침 ◆◆