

전력용 콘덴서는 무효전력을 보상하여 역률을 개선하기 위해 전력계통에 없어서는 안 될 기기이다. 콘덴서는 본래 절연신뢰성이 높은 기기인데, 고조파 발생부하로 싸이리스터 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

[해설]

a. $I_5 = 56A$

$U_5 = 2\%$

b. $I_7 = 21A$

$U_7 = 1.7\%$

c. $I_{11} = 12A$

$U_{11} = 1.8\%$

d. $I_{13} = 7A$

$U_{13} = 1.4\%$

즉 직렬리액터를 설치한 콘덴서를 투입한 상태에서 IEC-Publication 1000-2-2, 고조파 전압의 적합성 범위에 있음을 알 수 있다.

4. 콘덴서 및 직렬리액터 조건

4.1 콘덴서

전력계통의 무효전력을 개선하기 위해, 콘덴서 사용은 없어서는 안 될 중요한 전력기기이다. 그러나 계통에 존재하는 고조파의 영향으로 콘덴서를 운용하는데 많은 어려움을 겪고 있으며, 고조파 특성을 정확히 예측하고, 계산하는 것은 사실상

불가능하다고 할 만큼 어려운 기술이다.

따라서 앞에서 학습한 고조파 관련 지식을 체계적으로 이해하고, 현장 무효전력제어 및 운용기술과 접목함으로써 안정된 전력공급이 필수적이다. 이후 기술되는 내용은 일반적으로 콘덴서에 적용되는 관련지식이므로 종합적으로 다시 한번 복습하기로 한다.

1) 콘덴서의 성능과 사양

- (1) 사용 장소 : 옥내, 옥외 겸용
- (2) 사용 주위 온도 : $-20^{\circ}C \sim +40^{\circ}C$ 이내(콘덴서를 집중해서 설치할 때는 콘덴서의 간격을 적어도 25mm 정도 이상으로 할 것) 단, 24시간의 평균은 $35^{\circ}C$ 이하
- (3) 손실 : 0.25% 이하($20^{\circ}C$ 에서)
- (4) 최고 사용전압 : 정격전압의 115% 이하 단, 24시간의 평균은 110% 이하
- (5) 최대 사용전류 : 정격전류의 135% 이하 단, 고조파 전류를 포함(직렬리액터부는 그 회로에 제5고조파 전류를 함유할 경우, 그 함유율이 기본파 전류에 대해 35%이하이고, 그 합성전류가 정격값의 120% 이하)
- (6) 단자간 절연내압 : 정격전압의 2배(AC 1분간)

(7) 방전장치 : 방전저항(콘덴서 개방 후 고압용은 5분, 저압용은 1분에 50V 이하)과 방전코일(방전시간 5초에 50V 이하)이 있으나 다빈도 개폐되는 콘덴서에는 방전시간이 짧은 방전코일을 적용하는 것이 바람직함

2) 콘덴서 설치시 주의사항

콘덴서 설치시 주의사항으로는 1.1의 콘덴서 성능과 사양을 검토하여야 하며, 다음 사항도 체크하여야 한다.

(1) 콘덴서 용량은 전동기의 무효분보다 커지지 않을 것 콘덴서 용량이 너무 크면 전진 역률이 되어 전원전압의 상승, 변압기가 과열되는 외에 전진 무효전력에 의한 손실이 발생한다.

(2) 유도전동기의 자기여자 현상

유도전동기와 콘덴서가 병렬로 접속한 채 개폐기의 부하측에서 직결되어 있을 경우, 개폐기에 의해 개방되면 전동기 자신의 회전과 잔류자기에 의해 유도발전기가 되어 전압을 유지한다. 그래서 콘덴서 전류가 전동기의 여자전류보다 클 경우, 정격전압 이상의 과전압을 발생하여, 전동기 소손, 과도 토오크 발생, 콘덴서의 절연파괴 등을 초래하는 일이 있으므로 주의한다. 상세 해설은 [예제5]를 참고한다.

(3) Y-Δ 시동에서의 접속

유도전동기를 스타-델타로 시동할 경우, 스타에서 델타로 절환할 때 과도전압에 의해 절연파괴를 일으키는 수가 있으므로, 역률 개선용 콘덴서는 주개폐기 2차측에 설치한다.(Y-Δ회로 사이에 설치하지 않는다)

4.2 직렬리액터

1) 직렬리액터 선정

역률 개선용으로서 콘덴서를 사용하면 회로의 전압이나 전류 파형의 왜곡을 확대하는 수가 있고, 때로는 기본파 이상의 고조파를 발생하는 수가 있다. 이 고조파는 변압기의 이상 소음을 증대시키고, 콘덴서 회로에 이상전류를 발생시켜 콘덴서의 운전에 지장을 주기도 하고 고조파 전류에 의한 계전기류의 오동작을 일으키게 하는 수도 있다.

일반적으로 단상부하에는 제 3고조파 전류, 3상 회로에 포함돼 있는 고조파 차수는 제 5고조파가 가장 많고 다음이 제 7, 제 11차수로 되어 있다. 고조파의 발생원인으로서의 변압기의 철심에 의한 자기포화특성에 기인하는 것과 정류기 부하에 기인하는 것 등이 있다.

이들 고조파가 콘덴서의 회로 투입에 의해 전원측 리액턴스와 콘덴서 리액턴스 공진에 의해 확대되는데 기인한다.

이 공진주파수 는

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \dots\dots\dots (19)$$

로 표시되고 콘덴서와 인덕턴스의 크기로 결정되는데, 이 F_0 와 같은 주파수의 전류가 계통에 흐르고 있으면 콘덴서의 단자 전압은 이 전류 때문에 과대해져서 계전기의 오동작이나 전동기의 이상소음 등 피해를 낳는다. 대개 F_0 는 250~300Hz 등 전원주파수의 배수되는 고조파에 가까워지므로 회로 조건에 따라서는 공진을 일으키는 수가 있다.

전원측 리액턴스와 콘덴서의 직렬공진 주파수는 수식(20)으로 구할 수 있다. 따라서 전원측 리액턴스가 4%일 때, 직렬공진 주파수는 300Hz 가 되므로, 5고조파 전류가 콘덴서로 유입되는 것이다.

$$R_{Res} = \frac{60Hz}{\sqrt{P}} \dots\dots\dots (20)$$

여기서, $P : (\frac{X_L}{X_C})$

또한 콘덴서에 유입하는 고조파 전류는 기본파에 겹쳐서 흐르게 된다. 고조파를 줄이는 방법은 일반 3상 회로에서는 제 5고조파 이상을 생각하면 되고, 제 5고조파에 대해 회로를 유도성으로 하면 되기 때문에 콘덴서에 직렬 리액터를 삽입한다. 제 5고조파에 대해 유도성으로 하기 위해서는 직렬리액터의 인덕턴스 L, 콘덴서의 커패시턴스를 C라고 하면,

$$5\omega L > \frac{1}{5\omega C} \dots\dots\dots (21)$$

$$\omega L > \frac{1}{5^2} \cdot \frac{1}{\omega C} = 0.04 \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots (22)$$

즉, 콘덴서 리액턴스의 4% 이상되는 직렬리액터의 리액턴스가 필요하게 된다. 실제로는 주파수의 변동이나 경제성의 면에서 6%를 표준으로 하고 있다. 제 3조파가 존재할 때는 13% 가량의 직렬리액터를 넣을 수도 있으며, 이 경우에는 콘덴서 단

자전압이 상승하게 되므로 콘덴서 정격전압을 높여야 한다. 콘덴서 단자전압 상승은 수식(23)로 나타낸다.

$$V_c = \frac{V_N}{(1-P)} \dots\dots\dots (21)$$

여기서, V_N : 모선 정격전압
 V_c : 콘덴서 단자전압
 $P : (\frac{X_L}{X_C})$

2) 직렬리액터 사용시의 주의사항

(1) 콘덴서 단자전압의 상승
 6%의 리액터 삽입에 의해 콘덴서 단자전압은 약 6% 상승하고 콘덴서 전류도 약 6% 증가한다. 따라서 콘덴서는 약 13%의 용량이 증가하는 셈이므로 큐빅클 내의 발열을 검토할 때는 주의할 필요가 있다.

(2) 콘덴서와 용량을 합치는 일
 직렬리액터는 직렬기이므로 동일용량의 콘덴서와 조합시킴으로써 성능이 발휘된다. 가령, 6kVA의 리액터는 콘덴서 100kVA에 접속되면 비로소 리액턴스 6%가 되어 제 5고조파에 대해 유효하게 된다.

만약 이 6kVA 리액터를 콘덴서 50kVA에 접속한 경우에는

$$6[kVA] = (\frac{50[kVA]}{100[kVA]})^2 = 1.5[kVA]$$

가 되어, 콘덴서 50kVA에 대해서는 3%리액턴스가 되어 제 5고조파에 대해서는 효과가 없고 오히려 회로정수에 따라서는 증가하는 경우도 생긴다. 만일 콘덴서의 보수 점검상 리액터부 콘덴서 탱크에서 일부의 콘덴서를 제거한 채로 운전하는 경우, 리액턴스는 콘덴서 및 리액터의 제작허용치의 여유를 보아 5% 이하가 되지 않도록 주의할 필요가 있다.

(3) 콘덴서의 최대 사용전류는 그 총전류에 고조파가 포함돼 있는 경우, 그 합성전류의 실효값이 정격전류의 135% 이내라고 규정되어 있다. 콘덴서 전류가 정격전류의 120% 이상 흐르는 경우에는 고조파의 영향을 받고 있다고 믿어지므로 이런 경우에는 다른 기기에 악영향을 줄 것도 고려하여 직렬리액터를 사용할 필요가 있다.

(4) 모선의 단락전류가 큰 계통 또는 병렬콘덴서 군이 있는 경우에, 콘덴서에 직렬리액터가 부속되어 있지 않으면 콘덴서

투입시에 돌입전류가 과대해지기 때문에 CT 2차측 회로에서 플래시오우버 하는 수가 있다. 이와 같은 계통에 콘덴서를 접속할 때는 직렬리액터부의 것을 접속한다. 이 현상은 특히 고압회로에서

- 직렬리액터가 설치되어 있지 않을 때
- 전원 단락용량이 클 때
- 병렬뱅크에 직렬리액터가 없는 것이 있을 때
- 콘덴서에 잔류전하가 있을 때

CT 2차 회로에 과전압이 발생하여 접속되는 계기, 계전기, 기구의 소손을 일으킬 수가 있다. 또 CT비가 작으면 CT의 과전류강도도 문제가 된다. 이 원인은 콘덴서의 투입전류 및 과도주파수에 기인하는 것으로 대책은 직렬리액터를 설치하게 되는데 6%의 리액터를 설치한 경우의 투입전류, 주파수의 배수는

$$I_{max} = 1 + \sqrt{100/6} = 5\text{배}, f_i = \sqrt{100/6} = 4\text{배}$$

가 되어 문제가 되지 않는다. 그러나 직렬리액터가 없는 경우는 수십배의 돌입전류가 흐르게 된다.

(5) 고조파 전류로부터 콘덴서를 보호하기 위해, 다음 조건일 때는 직렬리액터를 설치한다.

- 고조파 발생 부하가 전체부하의 15%를 초과할 때
- 콘덴서 부하가 전체부하의 35%를 초과할 때

(6) 또한 직렬리액터를 설치하였다고 하더라도 과대한 고조파 전류가 유입하면 철심이 포화하고, 리액턴스의 저하를 초래하여 콘덴서회로의 리액턴스가 용량성이 되는 경우가 있다.

이때, 콘덴서 회로의 용량성 리액턴스와 전원측의 유도성 리액턴스 사이에서 공진이 발생하여 고조파 전류를 확대하므로 콘덴서 또는 리액터 손상을 초래하는 경우가 있으므로, 주의해야 한다.

실제로 현장에서는 콘덴서를 설치한 후 1년도 안 되어 소손되는 사례도 있다. 표 5는 전력용 콘덴서설비의 고조파 과부하 대책을 나타낸 것이다.

【표 5】 전력용 콘덴서설비의 고조파 과부하 대책

대 책		내 용
고조파 과부하가 되지 않는 설비로 한다.	표준 직렬리액터 6%	가장 일반적으로 사용되고 있음. 단 5고조파 보다 작은 차수의 고조파를 발생하는 부하일 경우에는 6%의 직렬리액터에서는 문제를 더욱 증대시키는 경우가 있으므로 주의
	특수한 직렬리액터 8%, 13%	제 5고조파 보다 작은 차수의 고조파원이 있을 경우를 대상으로 함. 이 경우 리액턴스를 크게 하면 콘덴서의 단자전압이 상승하므로, 이 상승이 콘덴서 정격전압의 허용값을 초과하는 경우 주의 (정격전압을 높일 것)
	과부하 내량을 크게 한 기기의 적용	고조파 확대 현상이 없어도 발생하는 고조파 량이 과대하여 과부하로 되는 경우, 직렬리액턴스를 크게 하는 방식보다 직렬리액터 및 콘덴서의 고조파 내량을 특별히 강화시킨 Type으로 사용하는 것이 경제적이며 또한 기술적으로도 바람직함 (Strongly detuned filter circuit)

5. 역률개선

일반적으로 전력부하는 유효분 전력 이외에 무효분 전력이 발생한다. 그로 인해 그림 10과 같이 유효분 I_R 전류 과 무효분 I_L 전류 를 합성한, 소위 겹보기 전류인 부하전류 I_I 이 커져서 변압기나 배전선에서의 전력손실을 증대시킨다.

역률이란? 이 유효분 전류와 겹보기 전류와의 위상각 θ 의 코사인 $\cos\theta_1$ 로 정의 되는데 $\cos\theta_1$ 을 $\cos\theta_2$ 로 작게 하는 것을 역률 개선이라 부르고 있다.

즉 전기에너지에서 필요한 것은 유효전력뿐이므로 무효전력을 경감시킴으로써 전력손실을 감소시키게 되는데, 그 수단으로 진상용 콘덴서가 사용된다. 지연역률의 부하는 무효전류를 여분으로 계통에 흐르게 하기 때문에 다음과 같은 장애를 가져온다.

- (a) 전력손실
- (b) 전압강하
- (c) 설비용량 증가

5.1 역률개선의 추진

역률 개선을 위해 콘덴서를 설치·운용에 있어서 콘덴서 설치위치 또는 계통조건·부하조건에 따라 과보상 되는 경우 모선전압의 과상승·고조파 왜곡의 증대 등 예상치 못한 문제가

발생되어 사고로 이어지는 경우가 많다. 따라서 사전에 적어도 다음의 체크항목을 재고할 필요가 있다. 표 6에 각종 부하의 역률 참고치를 표시한다.

- (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?