

콘덴서 보호방식 ②

콘덴서 및 리액터 소손 원인분석

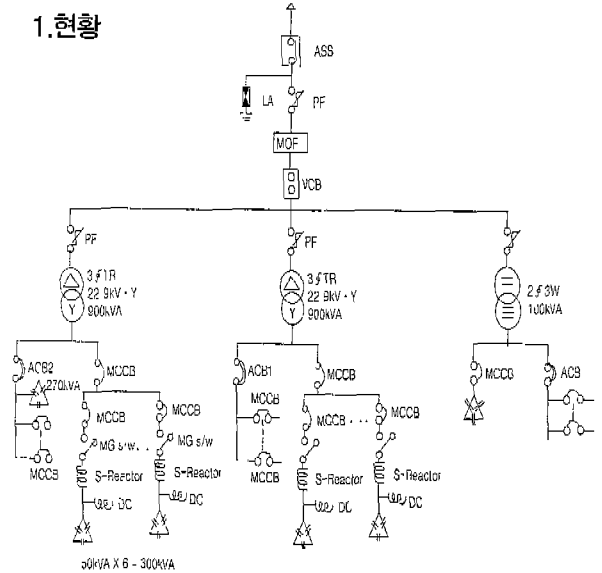
강문식
 웅비엔지니어링 대표
 발송배전기술사
 TEL. (02)967-4457



목 차

1. 전력용 콘덴서의 설치효과
2. 전력용 콘덴서의 구성
3. 전력용 콘덴서의 보호장치
4. 사고사례
5. 사고사례

1. 현황



[수변전설비 단선 결선도]

가. 도면에 나타내었듯이 저압반에 콘덴서를 집중하여 설치한 상태이고 ACB-2 PNL에 50kVA × 6 = 300kVA와 270kVA의 콘덴서가 병렬로 설치되어 있으며 ACB-1 PNL에 50kVA × 6 = 300kVA가 설치되어있다.

- 나. 부하는 125HP 모터를 비롯하여 다수의 인버터가 설치되어 속도제어를 실시하고 있다.
- 다. 역율조정을 위하여 APFR을 설치하여 역율 100%을 목표로 운전 중

2. 고조파 측정 현황

구분	l ₁	l ₃	l ₅	l ₇	l ₉	l ₁₁	l ₁₃
전류[A]	455.8	20.83	171.84	33.01	6.27	5.89	7.40
고조파함유율[%]	100	4.56	37.7	7.24	1.37	1.3	1.62

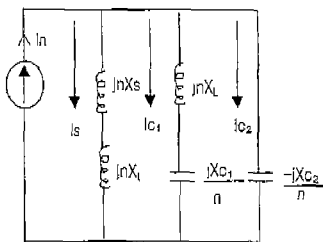
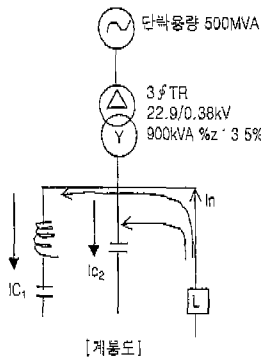
[ACB-1 PNL에서 CH-B Amps실측치][참조 고조파 분석 Data]

구분	l ₁	l ₃	l ₅	l ₇	l ₉	l ₁₁	l ₁₃
전류[A]	455.8	8.39	198.29	7.67	2.56	4.96	14.65
고조파함유율[%]	100	1.8	43.5	1.7	0.56	1.08	3.2

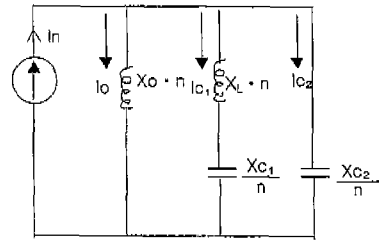
[ACB-2 PNL에서 CH-B Amps실측치][참조 고조파 분석 Data]

3. ACB-2 PNL에서 리액터 설치 콘덴서반의 문제점

가. 등가회로



등가회로를 어드미턴스 회로로 변환하면



n : 고조파차수 (1, 2, 3, ……)

X_o · n : 전원 계통 제n차 고조파 임피던스 [어드미턴스 Y_o = 1 / (X_o · n)]

X_{C2} / n : L이 없는 콘덴서의 제n차 고조파 임피던스

[어드미턴스 Y_{c2} = 1 / (-X_{C1} / n)]

X_L · n : L의 n차 고조파 임피던스

-X_{C1} / n : L이 있는 제n차 고조파 임피던스

[어드미턴스 Y_{c1} = 1 / (X_L · n - X_{C1} / n)]

I_n : 기기 제n차 고조파 전류

I_o : 전원 계통측 제n차 고조파 전류

I_{c1} : L이 있는 콘덴서 회로 제n차 고조파 전류

I_{c2} : L이 없는 콘덴서 회로 제n차 고조파 전류

나. I_{c1} 전류계산 (L이 있는 콘덴서에 유입전류계산)

(1) 실측치에 의해 제5고조파 전류 I_n은

I_n : 198.29 [A]

(2) 5고조파 어드미턴스로 구하면

$$Y_s = \frac{1}{\frac{(22.9)^2}{500}} = \frac{1}{n \times 1.04882} = \frac{1}{5 \times 1.04882} = 0.19$$

$$Y_o = \frac{1}{\frac{100}{0.3} \times 0.035 \times 5(n)} = \frac{1}{19.44} = 0.05144$$

Y_o = 0.04048

$$Y_{c2} = \frac{1}{\frac{100}{0.3}} = -\frac{1}{33.33} = -0.03$$

$$Y_{c1} = \frac{1}{\frac{100}{0.3} - \frac{100}{0.3 \times 5}} = \frac{1}{(5 \times \frac{100}{0.3} - \frac{100}{0.3 \times 5})} = \frac{1}{100 - 66.67} = \frac{1}{33.34} = 0.02999$$

(3) 등가회로에서 I_{c1}, I_{c2}, I_o 값은

$$I_{c1} = \frac{Y_{c1}}{Y_{c1} + Y_{c2} + Y_0} \times I_n$$

$$I_{c2} = \frac{Y_{c2}}{Y_{c1} + Y_{c2} + Y_0} \times I_n$$

$$I_0 = \frac{Y_0}{Y_{c1} + Y_{c2} + Y_0} \times I_n$$

$$I_{c1} = 198.29 \times \frac{0.02999}{0.04048 + 0.02999 - 0.0135} = 104.38[A]$$

$$I_{c2} = 198.29 \times \frac{-0.0135}{0.04048 + 0.02999 - 0.0135} = 46.9[A]$$

$$I_0 = 198.29 \times \frac{0.04048}{0.04048 + 0.02999 - 0.0135} = 140.89[A]$$

여기서 중요한 것은 리액터 없이 설치된 콘덴서로 인하여 제5고조파 전압전류가 확대되어 주변기기에 악영향을 미칠 수 있다는 것이다.

(4) 현재 역을 100% 목표로 APFR을 설치하여 운전하고 있으므로 등가회로에서 Y_c 의 어드미턴스 값은 콘덴서 투입용량에 따라 수시로 변동하고 있다.

- 200kVA 콘덴서 투입시 Y_c 의 값

$$Y_{c1} = \frac{1}{(5 \times \frac{100}{0.2} \times 0.06 - \frac{100}{0.2 \times 5})} = 0.02$$

$$I_0 = \frac{0.04048}{0.04048 + 0.02 - 0.0135} \times 198.29 = 170.85[A]$$

- 100kVA 콘덴서 투입시 Y_{c1} 값

$$Y_{c1} = \frac{1}{(5 \times \frac{100}{0.1} \times 0.06 - \frac{100}{0.1 \times 5})} = 0.01$$

$$I_0 = \frac{0.04048}{0.04048 + 0.01 - 0.0135} \times 198.29 = 217.05[A]$$

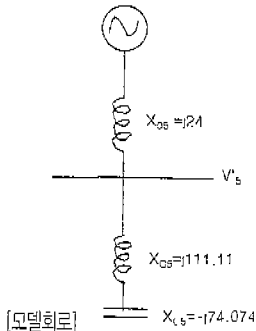
- 50kVA 콘덴서 투입시 Y_c 값

$$Y_{c1} = 0.005$$

$$I_0 = \frac{0.04048}{0.04048 + 0.005 - 0.0135} \times 198.29 = 350.9[A]$$

위의 결과로부터 콘덴서 투입 용량의 변화에 따라 콘덴서 설치 모선에서 확대되므로 주변 MCCB 기타 전력 기기에 악영향을 미치는 것을 확실히 알 수 있다. 또한, I_c 전류는 확대되지 않으나 리액터 없이 설치된 콘덴서에서 제5고조파 전압이 확대될 것으로 사료된다.

(5) 그것을 아래의 예에서 찾아 보면



여기서 V_5 를 계통의 제5고조파 왜곡율 : 3.31%

[고조파 분석 Data 참조]

V_5 를 콘덴서 접속 모선의 제5고조파 왜곡율이라 할 때

- 직렬 리액터가 없을 때

$$V'5 = \frac{-\frac{X_0}{5}}{5 \times 0.5 - \frac{X_0}{5}} \times V_5$$

$$= \frac{-74.074}{24 - 74.074} \times 3.31$$

$$= 1.479 \times 3.31 = 4.896\%$$

- 직렬 리액터가 있을 때

$$V'5 = \frac{111.11 - 74.074}{24 + 111.11 - 74.074} \times 3.31$$

$$= 0.60 \times 3.31 = 2.01\%$$

즉, 직렬 리액터가 없는 경우에는 제5차 고조파 전압 왜곡은 콘덴서 접속 모선에서 1.479배 확대된 4.896%가 되어 직렬 리액터의 허용 제5차 고조파 전압 함유율 허용값은 3.5%(기본과 전압에 대하여) 이하가 되어야 하는데 이 값을 초과하여 리액터 과부하 원인이 되어 소손에 이르게 된다.

(6) (5)항의 내용에서 리액터가 과부하가 되는 이유는 다음과 같다.

- 고조파를 함유하는 경우의 허용전류(JIS규격)

(I) 직렬 리액터

최대 허용전류는 정격 전류의 120%로 한다. 단, 이것은 리액터의 회로에 제5차 고조파를 포함하는 경우, 그 함유율이 기본과 전류에 대해 35% 이하인 합성 전류의 실효값이다.

(II) 콘덴서

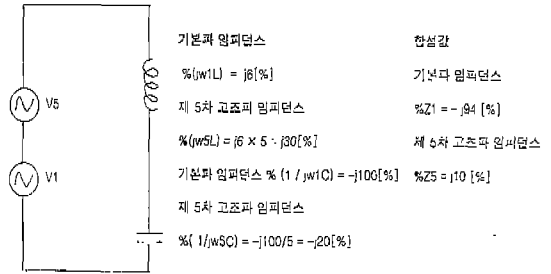
최대 허용전류는 정격 전류의 130%로 한다. 단, 이것은 용량의 실측값이 용량의 허용차 범위 내에서 플러스측인 것은, 그 분량만큼 다시 과전류의 증가를 인정한다.

고조파가 제5고조파뿐인 경우를 고려한다면, 콘덴서의 기본과 전류를 I_1 , 제5차 고조파 전류를 I_5 로 하면

$$\sqrt{I_1^2 + I_5^2} \leq 1.30I_1$$

따라서 $I_5 \leq 0.83I_1$

이 된다. 콘덴서에서 제5차 고조파 전류는 83%(기본파 전류에 대해)까지 허용한다. 한편 리액터는 위의 규정과 같이 제5차 고조파 전류는 35%(기본파 전류에 대해서)까지만 허용된다.



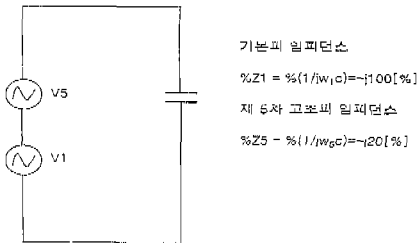
[모델회로]

(7) 여기서 콘덴서, 리액터 허용 제5차 고조파 전압 계산

(I) 콘덴서의 허용 제5차 고조파 전압

고조파가 제5차 고조파 전압만인 경우의 허용량으로 나타내면, 먼저 콘덴서만인 경우에는 아래 그림과 같이 제5차 고조파에 대한 임피던스는 기본파 임피던스 (-j100)의 1/5.

즉, -j20%이며 기본파 전류와 제5차 고조파 전류의 허용 합성값은 130%이기 때문에 이것들을 바탕으로 허용되는 제5차 고조파 전압은 다음의 계산과 같이 기본파 전압의 16.6%가 된다.



[모델회로]

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} \leq 1.30I_1$$

$I_5 \leq 0.83I_1$

이므로 허용 제5차 고조파 전압을 V_5 로 하면

$$V_5 = Z_5 \times I_5 = 0.2Z_1 \times 0.83I_1 = 0.166Z_1I_1 = 0.166V_1$$

(II) 콘덴서에 6% 직렬 리액터를 부착했을 경우의 리액터 허용 제5차 고조파 전압

위 그림에서 6% 직렬 리액터를 설치했을 경우에는 합성 임피던스 기본파에 대해서는 $-j100+j6=-j94[\%]$ 이지만, 제5차 고조파에 대해서는 $-j100/5 + j6 \times 5 = j10[\%]$ 가 된다. 이 경우 제5차 고조파 전류의 허용량은 리액터의 제5차 함유 허용량(기본파 전류의 35%)로 결정되므로, 다음 계산과 같이 제5차 고조파 전압의 허용량은 3.5%가 된다.

$$I_5 = 0.35 \times I_1 = 0.35 \times \left(\frac{V_1}{Z_1} \right)$$

단, 6% 리액터에 의한 콘덴서 단자전압의 상승에 따른 기본파 전류의 증가(1.06배)를 고려하면

$$I_5 = \left(\frac{0.35}{1.06} \right) \times \left(\frac{V_1}{Z_1} \right) = 0.33 \times \frac{V_1}{Z_1}$$

제5차 고조파 전압은 $V_5 = I_5 \times Z_5$ 이기 때문에

$$V_5 = I_5 \times Z_5 = 0.33 \times \frac{V_1}{Z_1} \times Z_5 = 0.33 \times \frac{V_1}{0.94} \times 0.1 = 0.035V_1$$

에 의해서 제5차 고조파 전압 함유를 허용값은 3.5% (기본파 전압에 대하여)가 된다.

이와 같이, 전원전압에 3.5%이상의 제5차 고조파 전압이 함유된 경우에는 직렬 리액터에 흐르는 전류가 허용전류 (제5차 고조파 전류35%)이상이 되어 직렬 리액터가 소손될 가능성이 있다.

(8) 결론적으로 ACB - 2 PNL에서 리액터 및 콘덴서의 소손 원인으로는

(I) 직렬 리액터 없이 설치된 콘덴서에 의해

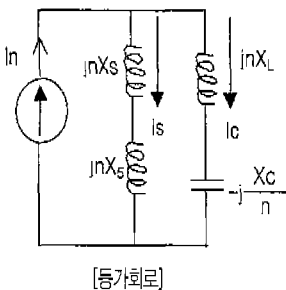
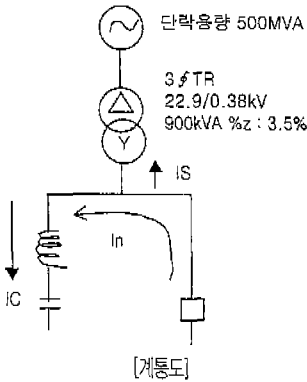
제5차 전압 왜곡율은 3.5% 근접하게 운전된 것이 실측값에서도 나타나고 있다.

(Ⅱ) 따라서 직렬 리액터가 제5차 고조파 허용전류에 근접하게 장시간 사용으로 과열되어 소손된 것으로 추정된다.

(Ⅲ) 직렬 리액터 없이 설치된 콘덴서 또한 정격전압 380[V]용으로 설치되어 있어 평상시 계통전압 400.1[V]로 운전되고 있고, 리액터 없이 설치되어 ON - OFF 시 과도한 돌입전류에 장시간 노출되어 소손된 것으로 사료됨.

4. ACB-1 PNL에서 문제점

가. 등가회로



나. 전류 계산

(1) 실측치에 의해 제5고조파 전류는

$$I_n = 180.3 \text{ [A]}$$

(2) I_c [A] 는 등가회로에서

$$Y_o = 0.04048$$

$$Y_c = 0.02999$$

$$I_c = \frac{Y_c}{Y_o + Y_c} \times I_n$$

$$= \frac{0.02999}{0.04048 + 0.02999} \times 180.3 \text{ [A]} = 76.73 \text{ [A]} \text{ 이므로}$$

제5차 고조파 전류는 확대되지 않은 것으로 나타난다. 하지만, 제5고조파 전압의 허용값 3.5% 이상을 초과하여 4.61%로 실측 DATA에서 확인 할 수 있으며 앞에서 설명하였듯이 제5고조파 전압 허용한계를 벗어나면 리액터가 먼저 과부하가 되며 소손된 것으로 사료됨.

(3) 결론적으로 ACB - 1 PNL에서 리액터 및 콘덴서 소손원인으로는

(Ⅰ) 제5차 고조파 전압의 함유율이 3.5% 이상 되어 직렬 리액터의 허용전류를 초과하여 운전하였다.

(Ⅱ) 콘덴서의 정격전압을 초과하는 전압으로 운전되었다. 실측치에서 보였듯이 라인 전압에 403.9[V]이고 리액터 설치로 429.68[V]로 장시간 노출되고, 이것은 13.07[%] 과전압으로 운전되어 소손된 것으로 사료됨.

5. 대책

가. ACB - 2 PNL 콘덴서 반의 대책

위 결과로부터

- 270kVA, 300kVA 콘덴서 반에 6%의 리액터를 설치한다.
- 제5고조파 전류 함유율 허용값이 70%인 리액터 설치.

구분	100kVA 콘덴서	50kVA 콘덴서	70kVA 콘덴서	비고
리액터 용량[kVA]	6.5	3.5	4.5	
리액터 정격전압[V]	14	14	14	
허용고조파 전류[%]	70	70	70	
콘덴서 정격전압[V]	405	405	405	
콘덴서 용량[kVA]	107	54	75	

나. ACB - 1 PNL 콘덴서반의 대책

- 300[kVA] 콘덴서 반에 6%의 리액터를 설치한다.
- 제5고조파 전류 함유율 허용값이 70%인 리액터 설치.

구분	리액터 용량 [kVA]	리액터 정격전압 [V]	허용 고조파 전류[%]	콘덴서 정격전압 [V]	콘덴서 용량 [kVA]	비고
50kVA	3.5	14	70	405	54	

다. 추가적인 보완 대책

- (1) APFR에 의해서 콘덴서의 투입제어를 함으로 전자접촉기의 3상동시 투입이 일어나지 않거나 방전코일에서 잔류 전압의 방전이 신속히 이루어지지 않으면, 과도한 돌입전류 및 과전압이 일어나므로 수시로 전자 접촉기 및 방전코일 상태를 확인하여야 한다.
- (2) 저압콘덴서 반에서의 사고는 주로 5고조파에 대한 내량 부족이 대부분이므로 위의 대책도 고조파 내량을 개선하는데 중점을 두었다.
- (3) 콘덴서 및 리액터를 제작사에 발주할 때는 위의 사항을 고려하여 제작자와 협의하고 될 수 있으면 KS 검정품을 사용하여야 한다.
- (4) 용량 선정에 필요한 참고자료
 - 콘덴서 정격전압

$$V_c = \frac{V}{1 - \frac{100}{L}}$$

- 콘덴서 용량

$$kVA = \frac{V}{1 - \frac{100}{L}}$$

- 리액터 정격전압

$$V_L = \frac{380}{1 - \frac{100}{L}} \times \frac{L}{100}$$

- 리액터 정격용량

$$kVA = \frac{100}{1 - \frac{100}{L}} \times \frac{L}{100}$$



2004 국제 전력전자 및 전기설비전시회 일정

일시 : 2004. 4. 20(화) - 22(목) 3일간

장소 : 코엑스 1층 인도양관

주최 : 한국전력기술협회

주관 : 나노커뮤니케이션, 케이웨어스, 서울메세 인터내셔널

후원(예정)

산업자원부, 한국전력공사, 에너지관리공단, 한국전기안전공사, 한국전기연구원, 대한전기학회, 대한전기협회, 한국전기전자재료학회, 전력전자학회, 한국전선공업협동조합, 한국조명·전기설비학회

전시대상 품목

- 전력전자, 전력품질 및 네트워크 시스템
 전력전자 기기 및 부품, 전자화 전력변환 및 제어 장치, 전원장치 및 기자재, 전력관리 및 감시제어 시스템, 원격검침시스템, 전력품질분석 및 관리, 고조파대책시스템, 접지시스템, 절전장치, 계측/진단/시험 시스템, 전기안전기, 기타 지능형/절전형 전기장치

- 전기설비 및 관련 기자재

발전설비 및 기자재, 송배전설비 및 기자재, 수변전설비 및 기자재, 배선설비, 동력설비, 낙뢰방지설비, 방재/안전설비및기자재, 엘리베이터/에스컬레이터, 조명 및 전열설비, 전기공사기자재

끝