



콘덴서 보호 방식 ①

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 (다음호)

1 전력용 콘덴서의 설치효과

가. 역율개선에 의한 전압강하의 감소

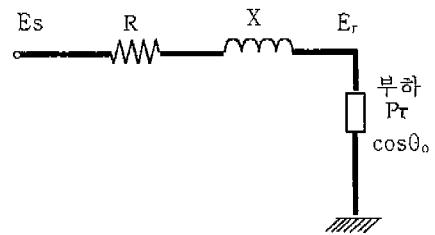


그림 1-1

그림과 같은 배전선로에서 E_r 를 수전단 전압, R , X 를 선로 저항 및 리액턴스, P_r 를 부하의 유효전력, $\cos\theta_0$ 를 부하전류 역율이라고 하면 전압강하 ΔE 는 다음식으로 표시된다

$$\Delta E = I(R\cos\theta_0 + X\sin\theta_0)$$

$$= \frac{P_r}{E_r} \times (R + X \tan\theta_0) \dots \dots \dots 1\text{식}$$

이때 수전단에서 병렬로 콘덴서를 설치해서 역율을 $\cos\theta_1$ 개선한 후의 전압강하 $\Delta E'$ 는 유효전류가 변하지 않는다고 가정하면

$$\Delta E' = \frac{Pr}{Er} (R + X \tan\theta) \dots\dots\dots 2\text{식}$$

1식과 2식을 비교하면

$$\Delta E - \Delta E' = \frac{XPr}{Er} (\tan\theta_0 - \tan\theta) \dots\dots\dots 3\text{식}$$

로되며 $\tan\theta_0 > \tan\theta$ 이므로 $\Delta E > \Delta E'$ 로된다.
이것은 곧 역률 개선에의한 전압강하 경감을 나타낸다

3식을 다음과 같이 간략화할 수 있다

$$\frac{\Delta E - \Delta E'}{Er} \times 100 = \frac{XPr}{Er^2} (\tan\theta_0 - \tan\theta) \times 100$$

$$\Rightarrow \frac{Qc}{Rc} \times 100(\%) \dots\dots\dots 4\text{식}$$

여기서, $Rc = \frac{E_r^2}{X}$ (콘덴서 설치모선의 단락용량)

$$Qc = Pr (\tan\theta_0 - \tan\theta) \dots\dots\dots 5\text{식}$$

이 결과로부터 콘덴서 설치에 의한 전압 상승은 콘덴서용량과 단락용량의 비로 쉽게 구한다

나. 역률 개선에 의한 설비용량의 여유증가

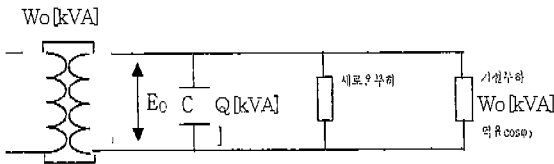


그림1-2 역률 개선에 의한 출력증가

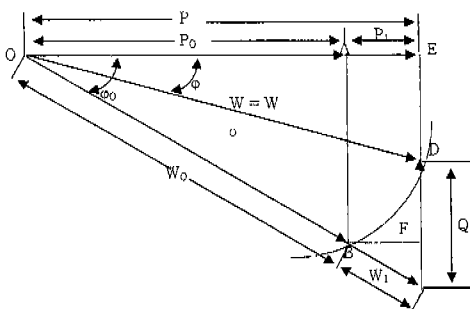


그림1-3 역률 개선에 의한 출력 증가의 벡터도

그림 1-2 와같이 정격용량 W_0 [kVA], 새로운부하 W_1 [kVA] 기설부하와 같은 역율의 피상전력 W_1 [kVA] 과 전력용 콘덴서 Q [kVA] 를 병렬로 접속시키고 또 W_0, W_1, Q 의 합성값이 W_0 와 같은크기로 되게 하였다면 이 때의 전력 관계에 관한 벡터도 그림1-3과 같이 된다

즉 Q [kVA]의 콘덴서를 접속하면 변압기의 합성역율은 $\cos\phi$ 로 개선되고 그 결과 이 변압기에서는 새로운 부하 W_1 [kVA](역율은 $\cos\phi_0$)만큼 더 공급할 수 있게 되는 것이다

여기서 역율 $\cos\phi_0$ 의 새로운 부하 W_1 [kVA] 에 대응하는 전력용 콘덴서의 용량 Q [kVA]는 벡터도로부터

$$Q = CE - DE = P(\tan\phi_0 - \tan\phi)$$

$$= W_0 \cos\phi (\tan\phi_0 - \tan\phi)$$

$$= W_0 \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_0} - 1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi} \right) [kVA] \dots\dots\dots 6\text{식}$$

$$\therefore \frac{Q}{W_0} = \cos\phi \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_0} - 1} - \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \right) \dots\dots\dots 7\text{식}$$

또 $P_0 = W_0 \cos\phi_0$ 이므로

$$\frac{Q}{P_0} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_0} - 1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi_0} \dots\dots\dots 8\text{식}$$

이 경우에 더 공급할 수 있는 부하 W [kVA](역율 = $\cos\phi_0$) 및 전력의 증가분 P_1 [kW] 은 다음과 같이 된다.

$$W_1 = BC = OC - OB = \frac{P}{\cos\phi_0} - W_0$$

$$= W_0 \left(\frac{\cos\phi}{\cos\phi_0} - 1 \right) [kVA] \dots\dots\dots 9\text{식}$$

$$P_1 = W_1 \cos\phi_0 = P - P_0 = W_0 (\cos\phi - \cos\phi_0) [KW] \dots\dots\dots 10\text{식}$$

다. 역률 개선에 의한 전기요금의 저감

역율이 90 [%] 이상인 경우

전기 요금[원] = 기본 요금 + 전력량 요금

기본 요금[원] = 계약 전력[KW] X 단가[원/KW]

전력량 요금[원] = 사용 전력량[KWH] X 단가 [원 /KWH]



역율이 90[%] 미만인 경우
전기요금[원] = 역율 90[%] 시 전기요금

$$(1 + \frac{\text{부족역율}[\%]}{100})$$

라. 역율 개선에 의한 전력손실 감소
선로손실 감소량과 역율개선 관계식을 보면
단상 2선식 1회선의 경우

$$W_L = \frac{2P^2}{V^2} \times R \times L (\frac{1}{\cos^2\phi_1} - \frac{1}{\cos^2\phi_2})$$

단상 3선식 1회선의 경우

$$W_L = \frac{P^2}{V^2} \times R \times L (\frac{1}{\cos^2\phi_1} - \frac{1}{\cos^2\phi_2})$$

단, 콘덴서에 의한 역율 개선후 선로손실 감소량 [KW]

- P: 부하전력 [KW]
- L: 선로의 길이 [m]
- V: 선간전압 [V]
- cosφ₁: 콘덴서 설치전 역율
- R: 1상의 단위 길이당 선로저항[Ω/m]
- cosφ₂: 콘덴서 설치후 역율

역율 개선에 의한 변압기 손실 감소의 관계식을 보면

$$W_T = \frac{P^2}{P_r} (\frac{1}{\cos^2\phi_1} - \frac{1}{\cos^2\phi_2}) (\frac{\alpha}{1+\alpha}) (\frac{100}{\eta} - 1)$$

- W_T: 콘덴서에 의한 역율개선 변압기 손실 감소량[KW]
- η: 변압기의 효율 [%]
- P_r: 변압기의 정격용량 [kVA]
- P: 부하의 전력 [kW]
- cosφ₁: 콘덴서 설치전 역율
- cosφ₂: 콘덴서 설치후 역율
- α: 동손/철손 비

2 전력용 콘덴서의 구성

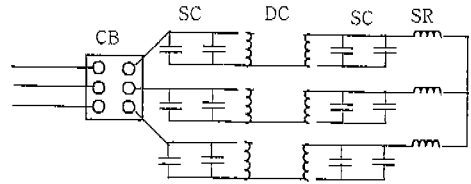


그림2-1 특별고압회로용의 결선방식

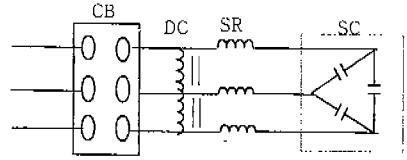


그림2-2 고압회로용의 결선방식

- 가. 특별 고압용 (11[kV]이상의것) 및 고압용 (6.6, 3.3[kV]의것)과 같이 차단기(CB), 방전코일(DC), 콘덴서(SC)본체, 직렬리액터(SR), 고장검출장치 등 각 요소로 구성되어 있다
- 나. 이들의 차이는 6.6, 3.3[kV]의 전압에서는 콘덴서 본체를 3상형으로 설계하는 것이 가격면에서 유리하기 때문이다
- 다. 한편 특별고압용은 고전압 대응량이기 때문에 콘덴서 본체를 3상기로 제작하면 치수가 과대해져서 방열이나 수송면에서 불리하다.
- 라. 특별고압용의 방전코일은 후에 기술하는 보호계전용의 PT를 겸한다.

3 전력용콘덴서의 보호방식

- 가. 전력용 콘덴서의 고장보호 종류로는 다음과 같은 것이 있다
 - 가) 계통의 이상시 콘덴서의 보호
 - 나) 콘덴서 설비내의 단락, 지락사고에 대한 보호
 - 다) 콘덴서 내부소자사고에 대한 보호
- 이들에 대하여 각각의 보호방식을 기술하면 다음과 같다.

나. 계통의 이상시 콘덴서의 보호

가) 일반적으로 과전압과 저전압을 예상할 수 있으며 이러한 현상을 확대시키지 않도록 해야 하는 것이다
한편 이들 보호계전기는 모선측 PT를 사용하는 것을 원칙으로 하고 있다.

나) 과전압 보호

콘덴서의 허용 장시간 전압은 일반적으로 정격 전압의 110% 정도로 이 이상의 전압에 대하여는 보호할 필요가 있으며 통상 유도형 한시과전압계전기를 사용한다. 과도적인 전압상승 등으로 인한 오동작을 막고, 기기를 확실히 보호토록 하기 위하여 정격전압의 130% 정도에서 동작되도록 하며 시한은 2초정도로 한다.

다) 저전압 보호

회로가 저전압 또는 무전압시 콘덴서가 투입되어 있으면 회로전압 회복시에 콘덴서만이 운전되면서 콘덴서에 의한 전압상승으로 인하여 타 기기에 손상을 주는 요인이 된다. 이러한 현상을 막기 위해 통상 유도형 한시 부족전압계전기를 사용하며, 모선 또한 선로의 사고발생시 이를 주보호계전기 동작 불확실 등으로 콘덴서 과방전을 방지하기도 한다. 동작전압은 정격전압의 70%이하로 하며 시한은 2초 정도이다

다. 설비내의 단락사고에 대한 보호

가) 단락보호

일반부하와 같이 유도형 부하는 한시과전류계전기를 사용하며 동작치는 콘덴서 투입시 투입 전류 직렬 Reactor를 갖는 경우(정격전류의 약 500%)에 오동작하지 않는 범위에서 감도를 낮출 수 있고 보통전류의 수배로 할 수 있으나 투입시의 순시요소를 lock 시켜야 한다.

나) 지락보호

전력용 콘덴서의 지락사고로는 모선지락, Reactor를 통한지락, 중성점지락 등이 있겠으나 이러한 것들은 중성점 접지방식, 대지분포 용량, 고장점의 접지저항에 따라 영향의 크기

가 다르며 일괄적으로 보호방식을 결정하기는 곤란하다. 보통 변전실 모선에 근접하여 콘덴서를 설치하므로 설비자체로서는 지락보호를 하지 않는 것이 보통이다, 특별히 필요한 경우에는 동일 모선에 접속된 타 Feeder와 같이 선택차단 방식을 적용한다.

라. 콘덴서 내부소자사고에 대한 보호

가) 고압용(3.3 ~ 6.6[kV]) 내부소자가 1개 또는 2개로 되어 있어 일반적으로 과전류 계전방식으로 일괄 보호하기도 하나, 특히 중요한 계통에서는 그림 2-3과 같이 과전압계전기를 사용한다.

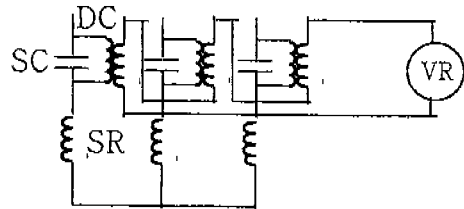


그림2-3 콘덴서내부사고보호(3.3~6.6[kV])

나) 특별고압회로(11 ~ 77 [kV])용 보통 콘덴서 내부 소자의 수가 다수로 구성되어 있고 소자의 절연파괴방전 coil의 층간단락 및 배선단락 등이 문제가 되며 그림2-4와 같이 차동전압방식을 사용한다. 본방식은 고조파, 계통불평형 돌입전류 등에 의한 영향이 없으며, 계전기로는 순시동작형을 사용하기도 하나 유도형한시계전기도 무난하다. 한편 계전기 동작전압치는 콘덴서의 정격전압, 균용량 등에 따라 다르며 각 경우에 따라 차 전압을 계산하여 결정한다.

다) 확대회로부 전압차동방식 회로전압이 높아짐에 따라 단위콘덴서 내부의 콘덴서 소자수가 많아 내부소자 1개 파손의 경우에도 확실히 검출하기 위해 감도를 높여야 할 필요가 있으며 이 때에는 그림 2-5와 같은 확대회로부 전압 차동방식을 사용하기도 한다.

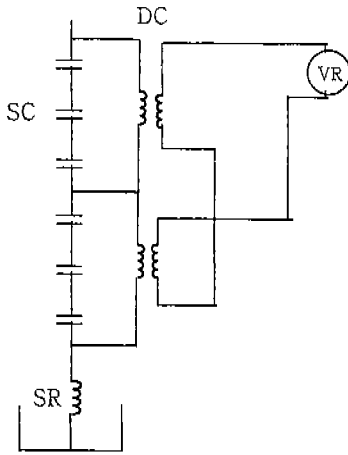


그림2-4 전압차동방식 1상분만 도시

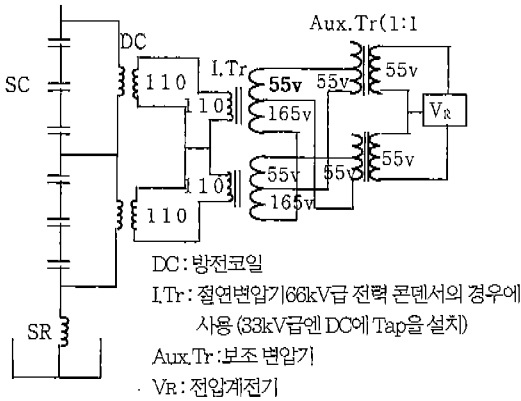


그림2-5 확대회로부 전압차동방식 (전압차7배확대)

마. 직렬 리액터에 의한 고조파 대책

가) 직렬 리액터의 역할

- 1) 전력 계통의 상용 주파수는 60[Hz] 이나 최근 많이 적용되고 있는 사이리스터에 의한 정류 장치 등으로부터 상용 주파수의 5배, 7배, 11 배 높은 주파수의 전류(고조파전류)가 전원 계통측으로 흘러나오고 있다.
- 2) 정전용량이 C[F]인 콘덴서는 주파수F[Hz]의 교류에 있어서의 임피던스는 $1/2\pi fC[\Omega]$ 이다, 즉, f에 반비례하므로 높은 주파수에 대해서 낮은 임피던스로 되어, 고조파 전류가 흐르고 쉽게 되어 있다.

- 3) SC를 고조파에 대하여 무대책으로 사용하면 상술한 사이리스터 장치 등에서 발생한 고조파전류가 SC설비에 유입되어 이상온도 상승 현상이 생긴다든지 전원 리액턴스와 공진해서 높은 고조파 전압이 나타난다든지 한다
- 4) 이러한 현상을 방지하기 위해 제5조파 이상의 주파수에 대하여 SC 설비가 유도성 임피던스가 되도록 SC의 콘덴서에 직렬로 리액터를 접속한다.
- 5) 직렬 리액터의 리액턴스치는 콘덴서 리액턴스치의 6%로 적용된다.
- 6) 직렬 리액터는 이상에서 기술한 고조파대책 외에 SC용 개폐기를 투입했을 때에 과도적으로 큰 전류가 흐르는 돌입전류를 억제하는 역할도 한다.

나) 직렬리액터 사용시 주의사항

- 1) 위에서 기술한대로 SC가 유도성 임피던스가 되기 위해서는 다음과 같이 계산된다

$$3WL > \frac{1}{3WC}$$

$$= WL > \frac{1}{9} \frac{1}{WC}$$

$$= 0.11 \frac{1}{WC}$$

$$5WL > \frac{1}{5WC}$$

$$= WL > \frac{1}{25} \frac{1}{WC}$$

$$= 0.04 \frac{1}{WC}$$

$$7WL > \frac{1}{7WC}$$

$$= WL > \frac{1}{47} \frac{1}{WC}$$

$$= 0.021 \frac{1}{WC}$$

여기서 제5고조파에 대해서 논하면 콘덴서 리액턴스 보다 4% 이상되는 직렬 리액터의 리액

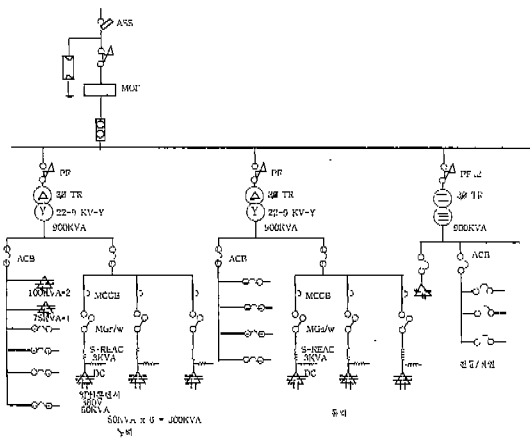
턴스가 필요하게 된다. 실제로는 주파수의 변동이 나 경제성의 면에서 6%를 표준으로 하고 있다.

2) 리액터 삽입에 의해 콘덴서 단자전압은 약 6% 증가한다.

3) 따라서 용량은 13% 증가되므로 배전반 내의 발열에 대해서 주의할 필요가 있다.

4. 사고 사례

가. 현황



ㄱ. 도면에 나타내었듯이 저압반에 콘덴서를 집중하여 설치한 상태이고 LV-1 PNL에 50kVA × 6 = 300kVA와 LV-2 PNL에 50kVA × 6 = 300kVA가 설치되었고 저압 LV-1PNL에 ACB2차에 100kVA × 2 = 200kVA, 75kVA가 설치되어 있다.

ㄴ. 현재 LV-1PNL의 ACB2차에 100kVA의 콘덴서가 소손으로 분리된 상태이고 LV-1의 콘덴서 및 LV-2콘덴서가 수시로 소손되는 사고가 발생되고 있다.

ㄷ. 부하는 125HP 모터를 비롯하여 다수의 인버터가 설치되어 속도제어를 실시하고 있다.

ㄹ. 역율조정을 위해 AFR을 설치하여 역율 100%을 목표로 운전중.

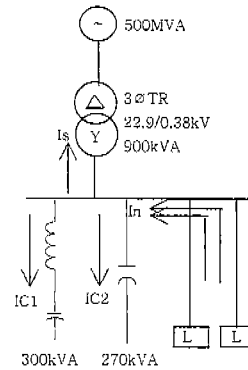
나. 문제점

ㄱ. 125HP 모터를 인버터를 이용하여 속도제어

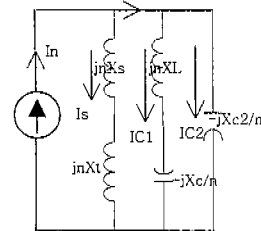
를 하므로 고조파를 발생하고 있다

이것을 검사한 결과 제3,5,7,9조파가 현저하게 발생되어 전원측의 콘덴서 반으로 유입되는 것으로 추정된다.

ㄴ. 여기서 콘덴서의 유입전류를 계산하면(단 현장연건상 전체적인 고조파 발생크기는 검사할수 없었으며 125HP 인버터에서 발생하는 고조파만으로 계산한다)



계통도



등가회로

구분	I1	I3	I5	I7	I11	I13
전류 (A)	71.8	16.4	51	46	12.5	7.6
고조파함유율 (%)	100	22.8	71	64	17.4	10.58

고조파 실측지

ㄷ. 계통을 100MVA BASE로 환전시

1) 전원 임피던스

$$Xs = jn \times 100/500 = jn 0.2 (p.u)$$

2) 변압기 임피던스

$$Xt = jn \times 0.055 \times 1000/900 = jn 6.1 (p.u)$$



3) 콘덴서 임피던스

$$X_{02} = j 1/n \times 1000/270 = j 1/n 370.37 \text{ (p.u)}$$

4) 콘덴서 임피던스

$$X_{01} = j 1/n \times 1000/300 = j 1/n 333.33 \text{ (p.u)}$$

5) 직렬리액터 임피던스 (6%) = $X_l = jn \times 100 \times 1000/300 \times 0.06 = jn 20 \text{ (p.u)}$

6) 콘덴서로 유입되는 고조파 전류

$$IC_2 = (jnX_s + jnX_t)(jnX_L - jX_c/n) \cdot I_n / (jnX_s + jnX_t)(jnX_L - j(X_c1/n + X_c2/n)) + (jnX_L - jX_c1/n) - (jX_c2/n)$$

7) 직렬리액터를 설치하지 않은 270KVA에 유입하는 전류를 계산하면

$$IC_3 = 19629.7 / -3739.694 = -5.249 \text{ (A)} \text{ (3고조파전류)}$$

$$IC_5 = -41769 / 3013.95 = -13.85 \text{ (A)} \text{ (5고조파전류)}$$

$$IC_7 = -176792.49 / 2405.49 = -73.49 \text{ (A)} \text{ (7고조파전류)}$$

$$IC_{11} = -161437.815 / -5168.4 = 31.23 \text{ (A)} \text{ (11고조파전류)}$$

$$IC_{13} = -144119.75 / -10926.53 = 13.189 \text{ (A)} \text{ (13고조파전류)}$$

콘덴서 유입전류

$$IC_2 = \sqrt{(410)^2 + (-5.249)^2 + (-13.85)^2 + (-73.49)^2 + (31.23)^2 + (13.189)^2} = 418.17 \text{ (A)}$$

이결과로 보면 270kVA 콘덴서는 문제가 없어 보이며 리액터 없이 설치함으로써 합성 임피던스가 리액터 설치된 콘덴서의 임피던스 값이 문제가 될 것으로 사료되며 다음호에서 그에대한 문제점 및 300kVA 콘덴서 및 리액터 소손원인에 대한 내용을 소개 하겠습니다.

다음호에 계속됩니다

프랭클린이 스스로 자기를 규제하기 위한 열세 가지 덕목(德目)

1. 절제(節制) - 너무 배가 부르도록 먹지말라. 너무 취하도록 마시지 말라.
2. 침묵(沈默) - 자기에게나 남에게나 이롭지 않은 것은 말하지 말라. 쓸데없는 말을 입방아 찧지 말라.
3. 규율(規律) - 물건은 모두 정해진 곳에 두라. 일은 모두 정해진 시간에 하라.
4. 결심(決心) - 할 수 있는 일은 해야겠다고 결심하라. 결심한 것은 시행하라.
5. 절약(節約) - 자기에게나 남에게나 이롭지 않은 일에는 돈을 쓰지 말라. 즉, 남용하지말라.
6. 근면(勤勉) - 시간을 낭비하지 말라. 항상 유익한 일에 종사하라. 쓸데없는 행위는 절대로 하지 말라.
7. 성실(誠實) - 술책을 써서 남을 해롭게 하지 말라. 공평 무사하게 생각하라.
8. 정의(正義) - 남의 이익을 손상시키지 말라. 주어야 할 이익을 주지 않고 남에게 손해를 주는 일이 없게 하라.
9. 중용(中庸) - 극단(極端)을 피하라. 분개해야 할 만한 불법에 대해서도 분노를 삼가라.
10. 청결(清潔) - 신체, 의복, 주거에 불결한 데가 없게 하라.
11. 평정(平靜) - 피할 수 없는 일에 부딪쳐도 침착하라.
12. 순결(純潔) - 성교(性交)는 건강이나 자손을 위해 서만 행하고, 이에 탐닉(耽溺)해서, 머리를 썩이거나, 건강을 해치거나 자타의 평안 또는 신용을 손상하는 짓은 하지 말라.
13. 겸약(謙讓) - 예수와 소크라테스를 본받으라.

-B. 프랭클린(미국의 정치가·사상가·과학자·문필가.

1706~90)-