

# 최신 에너지 절약 기술 ①

글/전 용 선 세종글로벌(주) 상무

유 상 봉 용인송담대학 교수/공학박사/기술사

## 목 차



1. 개요
2. 현 설비운용상 문제점
3. 전력설비의 에너지 절약
  - 3-1. 전력설비의 선로손실  
(근접효과, 표피효과, 와전류 손실)
  - 3-2. 고조파 (Harmonics)
  - 3-3. 무효전력 보정
  - 3-4. 실용화된 에너지절약 기기
4. 조명 절전 제어시스템
5. 에너지 절감효과 (사례)
6. 결론

### 1. 개요

기존 전력설비에서의 에너지 비용절감과 효율적인 운전을 위한 접근 방법은 개별 부하, 각 Branch Circuits 또는 주전원 수전부에 Passive 또는 Active Quality Correction 기기와 같은 전력관리 기술을 적용하는 것이다. 즉 부하의 운전효율을 향상시키고 기존 설비의 전력 품질을 유지 또는 향상시킬 수 있는 기술만이 진정한 에너지 비용절감을 실현할 수 있

는 것이다.

전통적인 전기 공학의 개념과 계산식과는 달리 실제 전체 전기설비 시스템 현장에서 일어나는 현상에는 중요한 특징이 있다. 일반적인 엔지니어링의 경우 Line Loss, Voltage Drop, Power Factor, Waveform Distortion 등 기타 중요한 운전상의 Factor들을 결정하기 위해 Ohms Law에 기초한 각각의 부하 및 회로를 독립적으로 설정하여 계산하여 왔다.

그러나 위의 일반적인 계산 방법이 거의 대부분 현장에서의 실제 결과와 크게 상이함을 알 수 있다.

또한 우리는 많은 효율 개선 기술이 두 가지 상반된 효과를 가지고 있음을 보아 왔다.

어떤 기술은 어떤 특정 부하에서 전력 소모를 감소시키는 효과가 있는 반면에 이 효과를 상쇄하는 제2의 부정적인 영향을 전체 설비에 주기도 한다. 따라서 에너지 절약 기술은 에너지 절감 효과와 함께 에너지 효율과 Power Quality를 감소시키지 않고 오히려 향상시킬 수 있는 것이 되어야 한다.

예를 들면 인버터를 적용함에 있어서 공정상의 특성 곡선에 적합한 기능 발위로 모터와 연계하여 단위부하의 에너지 비용 절감효과는 창출할 수 있으나 그 반면에 상당량의 “고조파”를 야기시켜 전력계통의 전력품질상의 장애를 발생시키고 전력 낭비의 주요 원인 요소로 작용하게 되는 것이다.

에너지 비용 절감의 실질적인 효과를 위해서는 전기요금 가운데 60%를 상회하는 동력용 모터 및 드라이브 시스템과 고조파 발생원

이 되고 있는 비선형 부하설비의 소모전력을 줄여야 하는 대명제를 안고 있다.

실질적인 전력품질개선과 에너지 비용 절감을 위해서는 이들 설비를 중심으로 전력 계통 전반을 진단하는 Full System Approach 방식이 효과적이며 특정 단위 모터 일부분의 에너지 절감으로 전체 설비의 절감을 추정하는 것은 크나큰 오류를 야기 시킬 수 있는 것이다.

따라서 전체 전기 설비에서 다양한 많은 에너지 절감 솔루션이 사용될 때 단위기기의 절감분을 합산한 그 이상의 보다 큰 효과를 볼 수 있다.

## 2. 현 설비 운용상 문제점

### 2-1. 선로손실과 전압 강하 (Line Loss & Voltage Drop)

우리가 현장 경험을 통해 얻은 교훈은 대규모 공장에서 Line Loss 및 Voltage Drop 또한 특별히 이들의 전체 시스템 성능과 비용에 대한 영향은 교실에서의 이론적 접근과 계산방법이 아주 정확치 않음을 알 수 있다. IR 및 전선의 직경 공식 두 가지는 단선되지 않은 일정한 길이의 전선에서 완전한 정현파의 교류가 기본 주파수(60Hz), 안정된 암페어와 전압으로 운전될 때에는 아주 정확한 예측 자료가 된다.

그러나 실제의 전력 시스템은 엄청난 종류와 수의 단위 전선으로 구성되어 있으며 어떠한 지점의 전류와 전압치는 순간순간 달라질 수 있다. 그리고 실제 운전 환경에서 기본 주파수의 완전한 정현파를 부하에 공급하는 것은 거의 드문 일이며 따라서 교실의 이론이 실제 현장에서 적용되지 못하는 것은 당연하다고 할 수 있다.

대규모 산업 플랜트에서 Line Loss와 Voltage Drop은 교실에서의 이론적인 계산치보다 훨씬 크며 독립적인 부하와 회로를 고려하는 종래의 계산 방법과는 달리 실제 산업 현장에서의 Voltage Drop은 전체 설비에서의 전압과 전류

에 광범위한 영향을 끼치게 된다.

### 2-2. 배선 및 배전용량 (Wiring & Distribution Capacity)

국제 규격 또는 안전규격(예: 미국의 National Electrical Code)에 부합하는 배선 및 전기 설비는 효율적인 운전이 보장되지 않는다.

미국의 NEC 규격은 화재로부터 안전한 전기 시스템의 설계 지침으로서 미국의 소방협회(National Fire Protection Association; NFPA)에 의해 제정된 규격이다. NEC의 단 하나의 조항도 에너지 효율면에서 기본으로서 검토되지 않았고 NEC의 의무 조항을 충족하는 설비에서조차도 매우 비효율적이고 고비용의 문제를 보아 왔다.

실제로 많은 생산 공장에서 불필요한 높은 전류와 왜형(Distortion) 전류를 보정하기 위한 노력이 필요한데, 왜냐하면 이들은 높은 전기 비용과 설비의 교체·보수 및 가동정지(Downtime)를 야기하기 때문이다.

### 2-3. 역률 보정 (Power Factor Correction)

부하 근처에서의 Capacitive Power Factor Correction의 가치와 효율성은 이론적으로 예측되는 것 그 이상으로 큰 것이다. 적절한 규격과 사이즈의 Capacitive Devices를 Inductive 부하에 아주 가까이 적용하여 상기에서 언급한 직접적이고 간접적인 2중 효과를 기대할 수 있다. 위와 같은 방법은 각기의 부하에 정확하게 맞는 규격의 Capacitors를 필요로 하지만 이를 통해 소비전력 절감, 시스템 성능 향상, Cascade Effect에 의한 절감, Downtime과 Maintenance 감소로 인한 절감 및 향상된 Power Quality로 인한 절감의 모든 이익을 얻을 수 있다.

현저한 Harmonic Content와 System Resonance를 설비의 전기 시스템에 유도하는 가장 확실한 방법은 잘못된 규격의(wrongly-sized) Capacitors를 Inductive Loads에 적용하는 것이

다. 그러나 정확한 규격의 Capacitors Banks를 각 개별 Inductive 부하에 적용할 때 효과를 얻을 수 있다.

이러한 설비 내에서 Reactive/Capacitive의 전체 Network의 상호작용으로 인하여 전체 시스템의 고조파 함유율을 현저하게 감소(Attenuate)시켜 줄 뿐 아니라 기본 주파수의 교류 정현파를 안정화(Stabilize)시키고 강화(Reinforce)시켜 준다.

그러나 이러한 모든 효과는 Capacitor를 처리 부하에 가능한 한 근접한 위치에 설치하고 부하의 실제 Operating Ampere에 맞추어 정확한 규격을 사용할 때 만 얻을 수 있다.

### 2-4. Lighting Correction

옛날에는 조명 효율을 높이기 위해 백열등을 형광등으로 교체하는 것이 대세였고, 오늘날은 Metal Halide와 같은 고압 방전등(HID) 또는 고효율 형광등으로 조명 효율을 높이는 추세이다. 형광등이 백열등보다 효율적이며 HID가 형광등보다 효율적인 것이 사실인 것처럼 기본적인 교류 정현파의 전원이 인가될 때 형광등이나 HID는 어느 것도 최고 효율의 조명 장치는 아닌 것이다.

이러한 조명 기술에서 안정적인 동작과 가시광선의 스펙트럼을 방출하기 위해 가장 중요한 요소는 Peak Voltage에 있음을 알 수 있다. 결과적으로 특별한 목적의 파형 변조(Waveform Modification) 기반의 전체적인 라인의 조명 절전 제어 시스템에 의해 조명 부하에서 조도 저하 없이 전력 절감과 운전비용 절감을 성취할 수 있다.

또한 현대의 효율적인 조명 분야에서 고려해야 할 또다른 요소는 고효율 형광등 및 HID의 안정기(Ballasts)가 설비의 총체적인 Harmonic Distortion에 작용한다는 사실이다.

조명 절전제어 시스템의 제2의 효과는 부하측으로 부더의 Broadband Harmonic Content를 억제하고 잡아 주도록 설계되어 있어 전체 설비의 운전효율 개선과 향상된 Power

Quality로 Cascade Effect(효율 증폭 효과)를 가능케 한다.

## 3. 전력설비의 에너지절약

### 3-1. 전력설비의 선로손실

근접효과(Proximity Effect), 표피효과(Skin Effect) 및 와전류 손실(Eddy Current Losses)

☞ 2000. 6, 7월호 전력시스템의 배전손실 참고

### 3-2. 고조파

#### 1) 고조파의 이해

전자 기기를 전력 시스템에 연결하여 사용할 때 전력(Power) “품질(Quality)”의 문제는 더욱 중요하게 된다. 안정적인(Stable) 전압과 찌그러지지 않은(Undistorted) 파형은 전력 시스템에서 바람직한 두 요소이다.

고조파란 무엇인가?

고조파는 어떻게 건물과 기기들에 영향을 미치는가?

어떻게 우리는 이 문제를 다룰 것인가?

고조파로 인한 비용은 어느 정도인가?

이 문제를 어떻게 해결할 것인가?

고조파는 찌그러진(왜형) 파형을 분석하기 위해 사용하는 수학적 모델이다.

전기 공학에서 “옴(Ohm)”의 법칙이라 불리는 법칙이 있다.

옴의 법칙은 흐르는 전류는 전압을 저항으로 나눈 값이라고 말하고 수학적으로 표시하면

$$I = V / R$$

이며 그림 1-1과 같이 표시하면 저항이 정수(Constant Number)이므로 전류는 또 다른 정현파가 된다.

인가된 정현파 파형의 전압이 동일한 정현파의 전류를 만들어 내므로 이런 형태의 시스템을 선형(Linear) 시스템이라 부른다. 백열등,

히터 및 대부분의 모터는 선형 시스템이다.

그러나 최근의 어떤 전기 기기들은 이 선형 시스템 범주에 속하지 않을 수도 있으며 컴퓨터, 가변 주파수 드라이브, 전자식 안정기(Ballast), UPS 시스템, 유도성 가열로 및 히터 등은 비선형(Non-Linear) 시스템이다. 이 시스템에서는 저항이 일정하지 않고 사실상 각 정현파에서 변화한다. 이러한 시스템의 전력 공급장치는 전력 트랜지스터, 사이리스터(Thyristors) 또는 SCR(Silicon Controlled Rectifiers)와 같은 반도체 소자를 내장하고 있다.

이러한 장치들은 전류를 펄스(Pulse)의 형태로 만들어 낸다.

아래 그림 1-2를 살펴 보면 반도체 전력 공급장치에 전압을 인가하면 전압 정현파에서 Firing Voltage(점화 전압)에 도달하기 전 까

지는 전류는 거의 흐르지 않는다. 그러나 점화 전압에 도달하면 트랜지스터 또는 기타 반도체 소자의 게이트(Gates)가 열려 전류가 흐르게 된다. 이 전류는 전압 정현파의 피크치에 이르기까지 증가하고 또한 정현파의 하향 곡선에서 Firing Voltage(점화 전압)에 이를 때까지 감소한다. 그러면 장치는 차단되고 전류는 제로가 되며 마찬가지로 정현파의 음(Negative)의 영역에서도 두 번째의 음(Negative)의 펄스 전류가 생긴다. 이런 형태의 시스템은 보통 비선형(Non-Linear) 시스템으로 불린다. 이런 형태의 전류를 만들어 내는 전력 공급장치를 스위치 모드 전력 공급장치(Switched Mode Power Supplies)라고 부른다. 일단 이런 형태의 펄스 전류가 생성되면 그들의 영향을 분석하는 데 어려움을 겪는다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 특별히

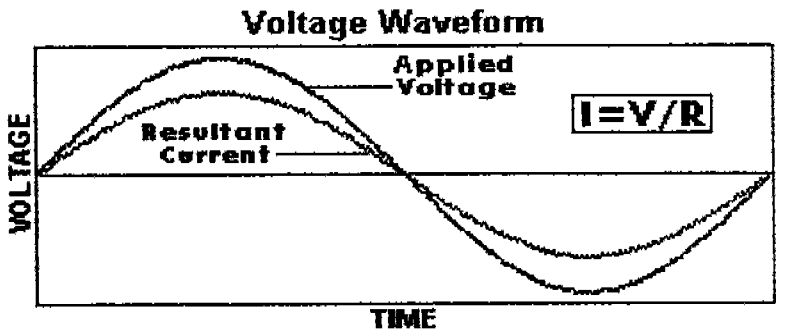


그림 1-1 Voltage Waveform

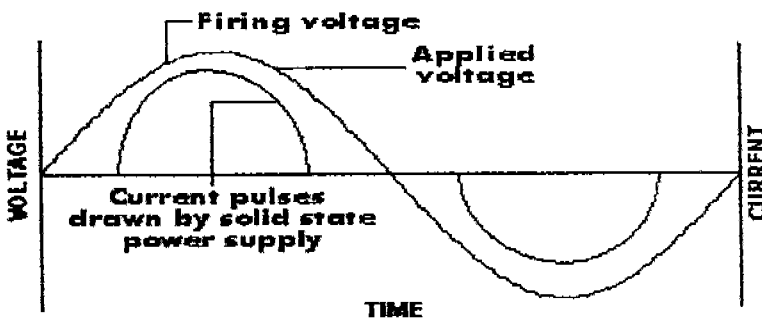


그림 1-2 비선형 시스템 - 컴퓨터, VFDs, 전자식 안정기

푸리에 분석(Fourier Analysis)을 통하여 입증할 수 있다. 어떠한 주기적인 파형이라도 일련의 서로 다른 주파수와 진폭의 정현파로 표시될 수 있다. 우리가 사용하는 주파수는 기본 주파수 60Hz의 몇 배수의 주파수이며 이 몇 배수의 주파수의 파형을 고조파라고 부른다.

제2고조파는 60Hz의 2배수인 120Hz이며 제3고조파는 180Hz 이다. 3상 전력 시스템에서 짝수 고조파(제2, 제4, 제6 등)는 상쇄되므로 홀수 고조파만 다루면 된다.

그림 1-3은 기본파와 제3고조파를 보여 준다. 그림과 같이 기본파의 한 싸이클에 제3고조파의 세(3) 싸이클이 존재한다. 이 두 파형을 합하면 우리는 비정현파(Non-Sinusoidal) 파형을 얻을 수 있으며 이 결과로 나타나는 파형은 그림 1-2와 흡사하다. 다른 고조파를 더하면 우리는 UPS나 VFD 시스템에서 발생하는 사각 파형과 같은 어떤 형태의 왜형의(찌그러진) 주기적 파형을 만들어 낼 수 있다.

이러한 고조파는 음의 범칙에 따라 전압 파형을 찌그러뜨리기 시작한다. 이 전압 왜형은 전자 기기에서 조기의 장애·고장을 유발한다.

3상 시스템에서 전력 시스템의 3개의 상(Phases)은 120도씩 차이가 나며 B상의 전류는 A상 전류의 120도(1/3 Cycle) 후에 생긴다.

이와 마찬가지로 C상의 전류는 B상 전류의 120도 후에 생긴다. 이것 때문에 60Hz 기본파 전류는 중성선에서 실제로 상쇄된다. 우리가 3상 선로에서 대칭인 60Hz 전류를 갖게 되면 중성선 전류는 제로가 될 것이다.

그러나 고조파 전류가 존재하면 이 수확은 깨진다. 3상 선로에 제3고조파 전류가 중성선에 들어오면 상쇄되지 않고 그것들은 합하여 상 선로보다 중성선에 더 많은 전류가 생기기도 한다.

이 고조파 전류는 열을 발생시키고 장시간의 열 발생은 중성선의 온도를 상승시키며 이 온도의 상승은 주위 선로를 과열시키며 절연 파괴를 일으킨다. 또한 이 전류는 전력을 공급하는 변압기를 과열시키기도 한다. 즉 중성선 및 변압기의 과열 그리고 기타 아래와 같은 장해가 있다.

- 회로 차단기의 귀찮은 트리핑(Tripping) 현상
- UPS 및 발전기 시스템의 오동작(Malfunction)
- 컴퓨터 오동작
- 계량·계측의(Metering) 문제
- 과전압(Voltage) 문제
- 전기 요금 증가

이러한 장해에 대한 몇 가지 해결책은 아래와 같다.

① 중성선 도선의 오버 싸이징(sizing)

중성선을 갖는 3상 회로에서 비선형 부하를 사용할 때 중성선 도선을 200%까지 오버 싸이즈(더 큰 규격으로)하는 것이 보통이다. 다량의 비선형 부하를 가진 피더(Feeders)에서 피더 중성선 도선과 부스바(Panelboard Bus Bar)는 오버 싸이즈 해야 한다.

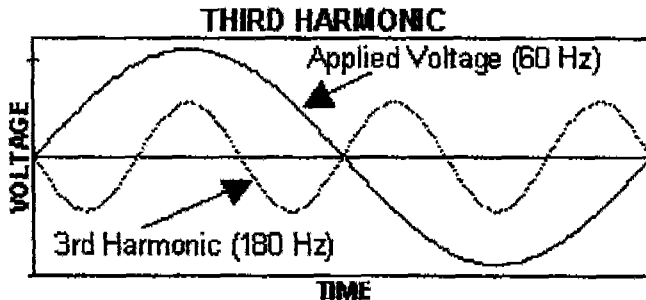


그림 1-3 고조파

② 변압기와 발전기의 오버 싸이징

고조파를 발생시키는 부하와 연결 사용하는 변압기나 발전기의 경우 증가된 써멀 용량(Thermal Capacity)을 갖는 오버 싸이즈 된 기기를 사용해야 한다.

③ Phase Shift 변압기

고조파는 불평형으로 나타나며 다음과 같이 불평형속에 포함된 고조파는 정상, 역상, 영상분으로 나뉘어진다.

Sequence	Harmonic Order
정 상	1 4 7 10 13 .....
역 상	2 5 8 11 14 .....
영 상	3 6 9 12 15 .....

즉 3고조파는 영상분고조파, 5고조파는 역상분고조파, 7고조파는 정상분고조파라 한다.

그림 1-4은 전동기 속도제어(ASD : Adjust Speed Drive)의 예로서 Phase Shift Tr을 설

치하여 30° 위상차이를 주면 고조파도 고조파 차수와 상회전에 따라 변위된다.

이것을 Harmonic Shift라 한다. 제5고조파는  $5 \times 30^\circ = 150^\circ$  고조파 변위(Harmonic Shift)되며 제7고조파는  $7 \times 30^\circ = 210^\circ$  고조파 변위된다.

즉 그림 1-5에서와 같이 제5고조파는 역상분 고조파이므로 고조파변위 150°에서 기본파 변위 30°가 같은 상순이므로 합하여져서 180°의 위상변위가 되며 제7고조파는 정상분 고조파이므로 고조파변위 210°에서 기본파변위 30°가 반대방향이므로 그 차이가 180°의 위상변위와 같은 값이 된다.

따라서 Phase Shift Tr에 의하여 위상을 30° Shift시키면 5, 7고조파는 반대방향이 되어 서로 상쇄하게 된다. 기존의 계통은 새로 변압기를 교체하거나 삼입하는 것이 불가능하므로 Phase Shift Tr을 삼입하여 인위적으로 위상변위를 줌으로써 고조파를 상쇄(Cancel)시킬 수 있다.

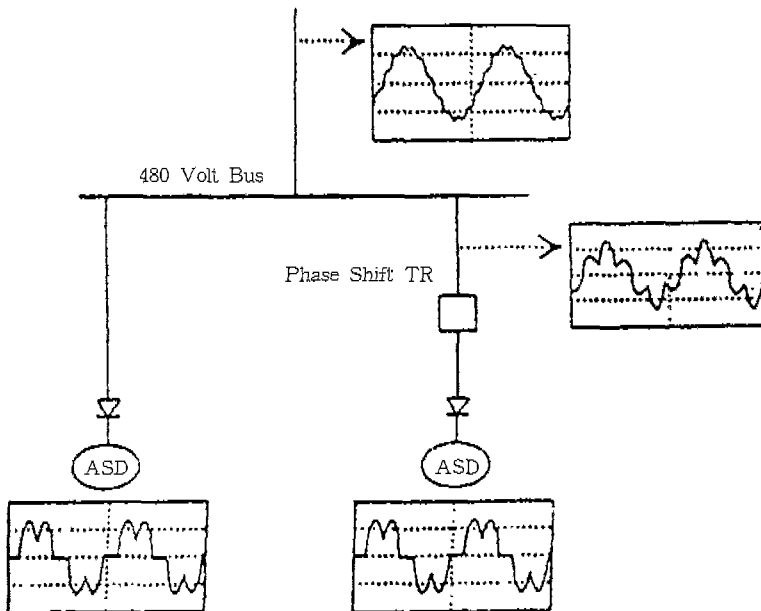


그림 1-4 전동기 속도제어에 Phase Shift Tr 설치 예

④ 필터링(Filtering)

어떤 필터들은 이 주파수 범위에서 잘 동작하지 않을 수 있다. 그러나 패시브 필터 또는 특별한 전자식 트래킹 필터는 고조파를 제거하기 위해 잘 동작할 수 있다.

이 필터들은 대폭적인 고조파 제거 및 역률 보정용으로 사용할 수 있고 전기 요금을 절감시킨다.

가. 수동 Filter

수동 Filter는 교류 Filter, L-C Filter, Passive Filter 라고 부르며, L-C 필터의 기본적인 회로는 L과 C의 공진현상을 이

용한 것으로 n차 고조파에서  $nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$ 로 함으로써 n차 고조파 전류는 대부분 여기에 흡수되고 유출전류를 저감시킬 수 있다.

LC 필터는 그림 1-6와 같이 부하와 병렬로 접속한다. LC 필터는 직렬 리액터와 전력용 콘덴서를 접속한 분로를 여러 분로로 조합해서 구성하고 있다.

각 분로는 고조파 차수에 직렬 공진시키는 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C)를 선정

하고 있으므로 각 고조파 차수에 대해 저임피던스가 된다.

이에 의해 부하에서 발생한 고조파 전류는 임피던스비에 의해 분류하므로 전원측으로의 분류는 적어지고 LC 필터에 많이 분류(흡수)하여 고조파를 억제하는 것이다. 또한 일반 진상콘덴서 설비는 LC 필터와 동일 구성이지만 직렬 리액터는 L = 6%를 접속하고 있다. 이 경우는 제4차 고조파와 공진하고 있다. LC 필터와 진상콘덴서 설비의 상위점은 공진점과 고조파 과부하 내량에 있다.

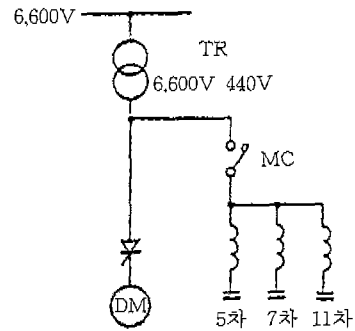


그림 1-6 LC 필터

다음호에 계속 됩니다

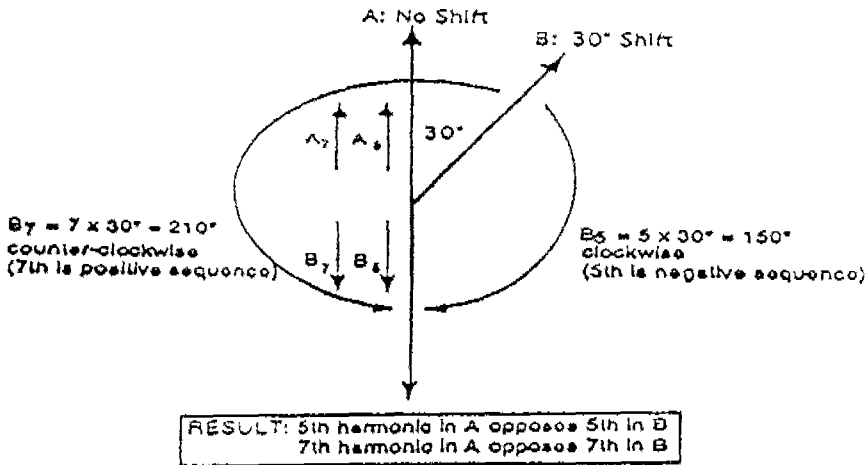


그림 1-5 Phase Shift 개요