

# 高調波와 發電機

한국에머슨일렉트릭(주)  
레 로 이 섬 머 사업부  
支社長 趙 圭 鎮

## 1. 序 論

電力電子 技術의 發達과 함께 最近 많은 負荷들 (電算設備과 通信設備用 整流器 및 UPS, 電子式 螢光燈 安定器, 엘리베이터, 製鐵 製紙 크레인 등을 爲한 電動機 制御裝置, 銲接器, 電氣爐)은 電源側으로 부터 高調波 電流을 점점 더 要求하고 있으며, 이에 따른 電源側의 電壓의 찌그러짐에 의하여, 負荷 設備, 配電 系統 또는 韓國電力의 系統에서의 故障 (誤動作, 動作 不能 또는 停電)이 자주 發生하고 있다.

이 高調波의 對策은 다음과 같다.

- 1) 高調波를 적게 흘리는 負荷를 選定한다.
- 2) 電源측의 임피던스를 낮춘다.
  - 韓國電力으로 부터의 受電容量을 增加시킨다. 이 境遇 相當한 初期 投資가 必要하며, 電氣 料金도 上昇한다.
  - 自體의으로 發電機를 設置하여 單獨 또는 韓國電力과 竝列로 使用한다.
- 3) 受動 또는 能動 필터를 使用한다. 이 境遇 相當한 費用과 技術檢討, 設置 空間등이 必

要하다는 短點이 있다.

어차피 非常用, 常用 또는 熱併合 發電機를 設置해야 할 境遇에, 過去와는 달리 미리 高調波에 대한 追加的인 技術的 檢討를 한다면, 時間的 經濟的으로 많은 節約을 할 수 있을 것이다.

本稿에서는 發電機가 發生하는 高調波에 의한 負荷에의 影響 그리고 高調波를 發生하는 負荷에 의한 發電機에의 影響과 對策을 紹介한다.

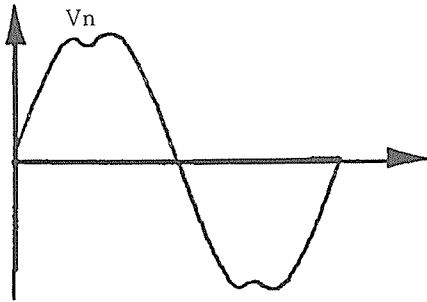
## 2. 發電機가 發生하는 高調波에 의한 負荷에의 影響

負荷가 高調波를 전혀 發生하지 않는 線形 負荷 (抵抗, 콘덴서, 飽和하지 않는 磁氣回路를 갖는 리액터와 變壓器 등)라 할지라도 發電機 自體의 特性에 의하여 發電機의 端子電壓은 純粹한 正弦波가 아니며, 高調波를 包含한다.

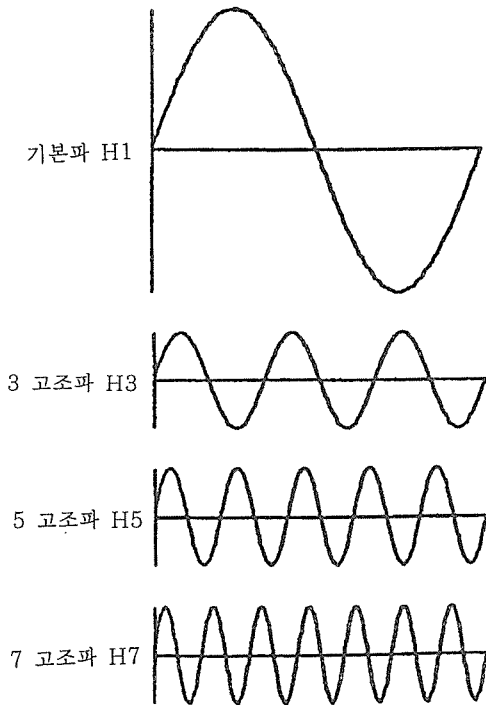
### 2.1 電壓의 푸리에(Fourier) 級數 分析

이 波形은 푸리에 級數를 利用하여 純粹한 正弦

波들의 합으로 分解할 수 있다.



(그림 1) 線形 負荷時의 發電機의 出力 電壓의 例



(그림 2) 푸리에 級數에 의한 波形의 分解

이 分解는 無限히 繼續되며, 그 크기는 점점 더 작아진다. 發電機의 경우, (+) 와 (-) 部分의 波形이 對稱이기 때문에, 高調波들은 모두 홀수의

次數들 뿐이다.

## 2.2 第3 高調波 (H3)

發電機의 內部 展開圖, 磁束의 配置, 磁束의 푸리에 級數 分解 등은 아래의 같다.

高調波中에서 第3 高調波의 影響이 가장 크므로, 각 相 (U, V, W)의 捲線들에 交叉하는 磁束들과 誘起되는 電壓의 波形을 푸리에 級數로 分解하여 基本波와 第3 高調波만을 보여준다. 基本波들은 各各  $120^\circ$  또는  $(2\pi/3)$ 씩 位相差를 갖고 있지만, 三相 모두의 경우에 第3 高調波 電壓들은 同一 位相이 된다.

## 2.3 捲線 피치 (winding pitch)와 高調波

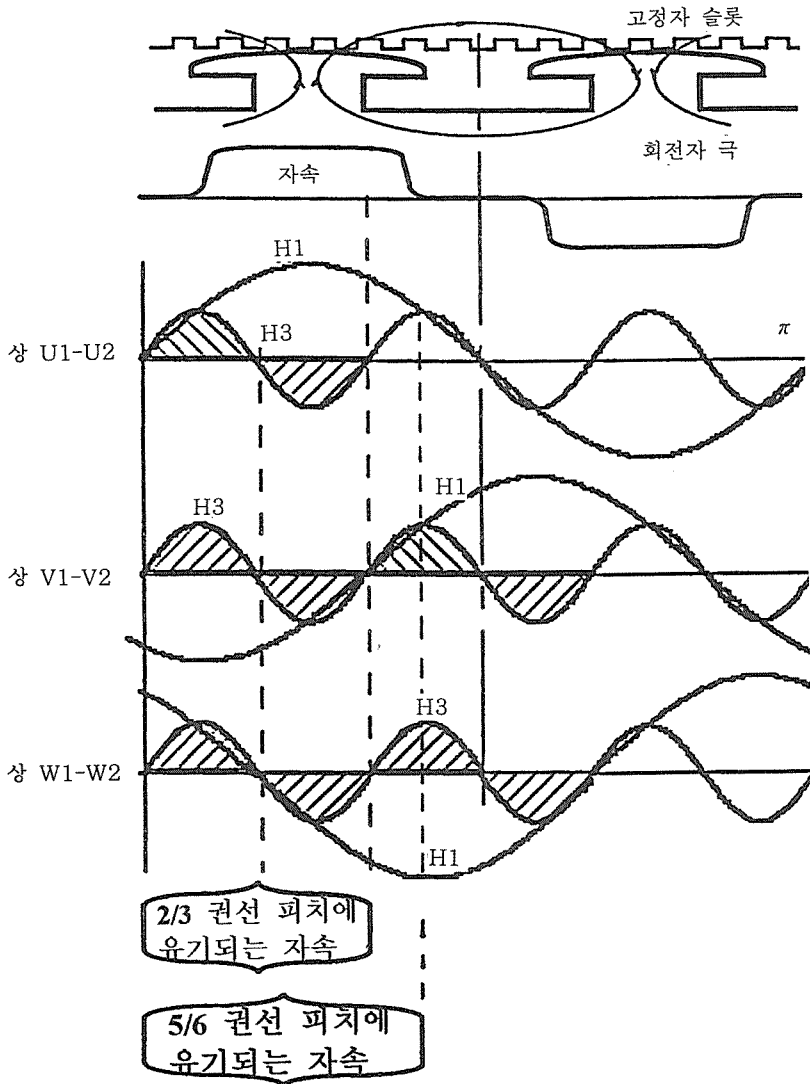
短節捲의 定義: 捲線의 피치가 極間 피치의  $2/3$ 인 捲線 方式

全節捲의 定義: 捲線의 피치가 極間 피치의  $2/3$ 를 超過하는 捲線 方式

全節捲의 發電機는 3, 5, 7次 (가장 問題를 일으키는 次數들) 高調波들을 發生한다. 만약 피치를  $1/7$  減少시키면, H7을 除去할 수 있고,  $1/5$  減少시키면, H5을 除去할 수 있으며,  $1/3$  減少시키면, H3을 除去할 수 있다.

(그림 3)에서,  $2/3$  捲線 피치의 境遇, 코일에 交叉하는 第3 高調波의 磁束의 合이 恒常 0이므로 ((+) 와 (-) 部分의 面積이 相殺된다.), 코일에 第3 高調波의 電壓이 誘起되지 않는다. 따라서, 第3 高調波의 電流도 흐르지 않는다.

$5/6$  捲線 피치의 境遇, 코일에 交叉하는 第3 高調波의 磁束의 合이 0이 아니고 그 값이 存在하므로, 코일에 第3 高調波의 電壓이 誘起된다.



(그림 3) 第3 高調波 磁束과 電壓

따라서, 各 相에 同一 位相인 第3 高調波의 電流가 흐르게 되고, 中性點을 使用하는 境遇에는 그 電流의 3倍의 크기인 第3 高調波의 電流가 中性線을 通하여 흐르게 된다.

標準 發電機의 捲線 피치에 따른 高調波 電壓의 成分은 다음과 같다.

만약 三相 負荷가 平衡되어 있고, 線形(SCR과

같이 高調波를 發生하지 않는) 負荷라면, 負荷가 變하더라도, 위의 高調波 含有率은 維持된다.

發電機의 同一한 電壓을 發生하기 위하여 短節捲의 경우에는 全節捲에 比하여 磁束을 덜 效果의 으로 活用하기 때문에, 同一한 크기와 重量의 發電機인 경우에 短節捲 發電機의 出力은 全節捲 發電機의 出力으로 부터 적어도 10% 低減

(derating)해야 한다. 즉, 第3 高調波로 인한 問題를 除外하고는 全節捲의 發電機가 더 經濟的이라고 할 수 있다.

	5/6 捲線 피치	2/3 捲線 피치
無負荷時 線間	3%	3%
無負荷時 相-中性點	4%	2.6%
負荷時 相-中性點	12%	4%

### 2.4 第3 高調波와 中性線 電流

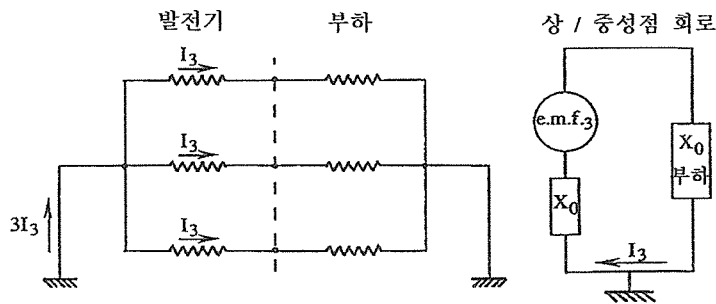
捲線 피치가 2/3가 아닌 全節捲(5/6 捲線 피치 또는 6/6 捲線 피치)으로 設計된發電機의 境遇에는, 線間電壓에는 第3 高調波 電壓이 存在하지 않지만, 相-中性點 사이에 第3 高調波의 電壓을 發生하며, 各 相의 第3 高調波 電壓들은 同一한 位相이다. 一般的으로, 第3 高調波 電壓은  $V_n$ (定格電壓)의 12~20% 範圍이다.

이 第3 高調波 電壓에 의해 第3 高調波 電流가 各 相에 흐른다. 三相 모두의 境遇에 第3 高調波

電流들은 同一한 크기와 位相이므로 零相電流와 同一하다.

第3 高調波 電流의 크기는(第3 高調波 電壓)/{(第3 高調波에 대한 發電機의 零相 임피던스  $X_0$ ) + (負荷의 零相 임피던스  $X_0$ )}에 의해서 決定된다.

만약 中性點을 連結하면, 三相 平衡 負荷인 境遇에도 이 相電流들의 3배에 該當하는 크기의 第3 高調波 電流가 中性線에 흐르게 된다. 물론 發電機의 中性點을 連結하지 않으면, 第3 高調波 電流는 흐를 수 없다.



(그림 4) 發電機와 負荷의 中性點 連結

6/6 捲線 피치의 境遇에는 5/6 捲線 피치의 境遇보다 더 높은 第3 高調波 電壓, 더 큰 第3 高調波 電流, 그리고 中性線 電流가 發生한다.

여러 가지의 全節捲인 發電機에 대하여 實際로 測定한 例는 다음과 같다.

發電機 規格	相電流 (A)	中性線 電流(A)	中性線 電流/ 相 電流 (%)	中性線 電流的 周波數 (Hz)
24kW 220V 60Hz	60.4	9.3	15.4	180
55kW 220V 60Hz	133.8	57.5	43.0	180
77kW 380V 60Hz	117	79.3	67.8	180

## 2.5 第3 高調波 電流的 影響

第3 高調波 電流的 被害는 다음과 같다.

- 1) 三相 四線式에 의하여 相-中性線을 使用하  
는 單相 負荷(家庭用 器機, 照明, 電動 工具,  
單相 變壓器 등)에서 不必要한 高調波 損失  
을 發生하며, 過熱과 燒損을 招來할 수 있  
다.
- 2) 發電機와 中性線에서 追加的인 損失과 溫度  
上昇을 일으킨다.
- 3) 中性線으로 必要 以上の 굵은 電線을 使用해  
야 하므로, 追加 費用이 發生할 수 있다.
- 4) 保護 繼電器들이 誤動作 할 수 있다.
- 5) 電力 測定이 잘못 表示될 수 있다.

## 2.6 第3 高調波와 中性點

第3 高調波 電流는 結局 中性線을 통해서 흐르  
므로, 中性點을 어떻게 使用하느냐에 따라서 第3  
高調波의 影響을 減少하거나 除去할 수 있다.

### 2.6.1 發電機의 單獨 運轉

捲線 피치와 關係 없이, 中性點은 直接 接地하  
거나, 中性線으로 活用할 수 있다. 短節捲을 使用  
해야 할 必要가 있는 例外로는 負荷쪽의 人力 임  
피던스가 낮은 境遇들이다.

例를 들면, 發電機와 變壓器의 中性點이 直接  
(接地를 통해서 또는 中性線의 配電線을 통하여)  
連結된 狀態로 主 變壓器(Y 結線)와 發電機가 連  
結되는 境遇이다. 이것은 竝列 運轉 中인 複數 臺  
의 發電機들이 1臺 또는 複數 臺의 變壓器들과 連  
結되는 境遇에도 同一하게 適用된다.

또한 同期 電動機 또는 다른 發電機와의 連結  
時에도 短節捲을 使用해야 한다.

### 2.6.2 다른 發電機와의 竝列運轉

- 1) 모든 發電機들이 短節捲인 境遇

모든 中性點들은 接地를 통해서 또는 中性線  
의 配電線을 통하여 直接 連結해도 된다.

- 2) 短節捲은 아니지만, 同一한 피치를 갖는 發  
電機들인 境遇

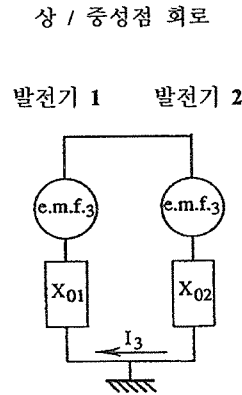
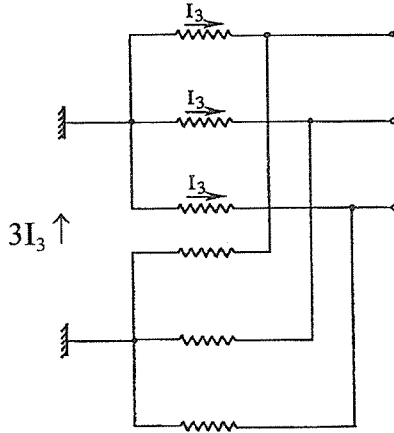
中性點들은 直接 連結해도 된다.

만약 發電機 1과 發電機 2가 同一하다면, 第  
3 高調波 電壓이 同一한 크기이며, 反對 位  
相이므로,  $I_3=0$ 이 된다.

發電機간에 有效電力(kW)과 無效電力  
(kVAR)의 負荷分擔이 잘 되고 있는 限, 中  
性點들에 第3 高調波 電流가 深刻한 程度로  
흐르지는 않는다. 그러나, 이 負荷分擔이 잘  
되지 않는 過渡 期間(例를 들면, 새로 竝列  
投入된 後에 負荷를 增加시키는 過程) 동안  
에는 相當한 크기의 第3 高調波 電流가 흐

를 수 있다. 이 電流는 中性點에 限流 리액

터를 使用하여 減少시킬 수 있다.



(그림 5) 發電機間의 中性點 連結

3) 서로 다른 捲線 피치 또는 다른 製造者의 發電機들인 境遇

中性點들을 直接 連結하는 것을 避해야 할 必要가 있다.

直接 接地 뿐 아니라 中性線의 配電線 活用을 爲해서도, 오직 1대의 發電機의 中性點만을 使用할 必要가 있다.

만약 中性點 또는 中性線을 活用할 境遇에는, 第3 高調波 電流를 制限하기 爲하여 發電機의 中性點에 임피던스를 插入해야 한다.  $3 \times 60\text{Hz} = 180\text{Hz}$ 의 높은 周波數에서 實際的인 임피던스가 3배로 되는 誘導性 임피던스를 使用하는 것이 좋다.

만약 中性點들을 반드시 直接 連結해야만 하는 境遇에는, 그림 ——에서 發電機 1과 發電機 2가 同一하지 않다면, 發電機 間에 第3 高調波 電流의 循環을 防止하기 爲하여, 다음의 2가지 可能性이 있다.

① 2/3 捲線 피치의 發電機들을 使用한다.(第3 高調波 電壓=0)

② 發電機 2를 特別하게 設計해야 한다.

— 無負荷 竝列 運轉 時에 對하여 : 同一한 捲線 피치이면서, 同一한 第3 高調波의 磁束成分을 갖도록 해야 한다.

— 定格 負荷 竝列 運轉 時에 對하여 : 電機子 電流에 의한 두 發電機의 第3 高調波 誘起電壓의 成分들이 同一해야 한다. 이 條件을 滿足시키려면, 發電機의 크기가 增加할 수 있다.

## 2.7 第3 高調波를 위한 發電機

結論的으로 中性線을 利用하거나, 中性點을 接地하는 境遇에는, 發電機의 出力을 低減해야 하는 不利한 點에도 不拘하고, 더 優秀한 波形을 얻고 第3 高調波를 除去하기 爲하여 2/3 捲線 피치를

갖는 發電機를 使用해야 한다.

實際로 低壓인 境遇에 많은 使用者들이 中性點을 直接 接地하기 때문에, 유럽의 大部分의 發電機 製造者들은 2500kVA 이하의 低壓 發電機들을 2/3 捲線 피치의 標準으로 製造하고 있다.

### 3. 高調波 負荷에 의한 發電機에의 影響과 對策

#### 3.1 非線形 負荷

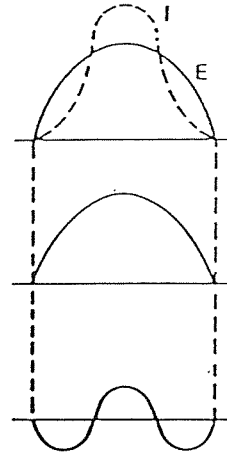
電流가 어느 瞬間에서나 電壓에 比例하면, 그 負荷는 線形이라고 한다. 이 境遇, 만약 發電機의 電壓이 正弦波이면, 負荷 電流도 正弦波이다.

이와 反對로 電流가 電壓에 比例하지 않으면, 그 負荷는 非線形이라고 한다. 다이오드, SCR, 트랜지스터, 飽和가 되는 磁氣回路를 갖는 리액터와 變壓器, 鎔接器 등이 있다. 非線形 負荷의 境遇, 무슨 일이 생기는가? 두 가지 例를 들어 본다.

#### 3.1.1 가스 放電燈

電流 波形은 여러 가지의 크기와 周波數가 다른

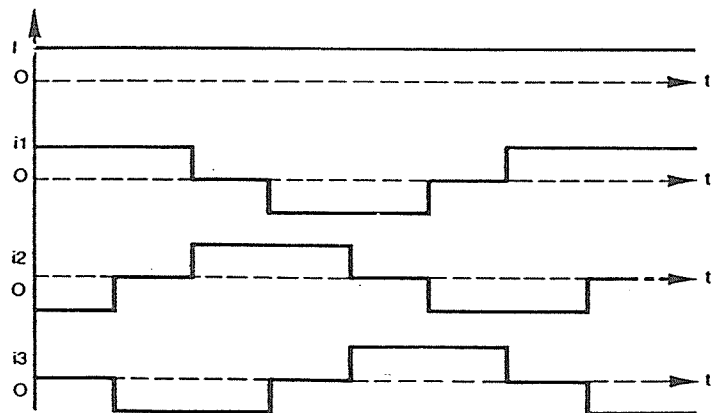
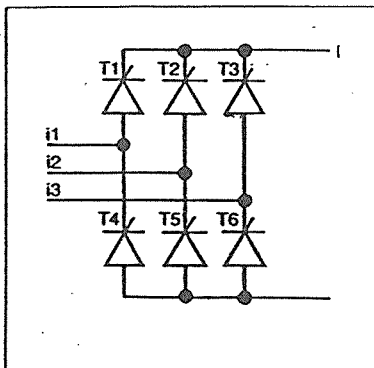
正弦波로 分解될 수 있다. 第3 高調波는 180Hz의 周波數이며, 이 種類의 負荷에서 가장 重要的 것으로 取扱된다.



(그림 6) 가스 放電燈의 電流 波形과 第3 高調波

#### 3.1.2 三相 全波 制御 整流回路(6 펄스 SCR)

理想的으로 平滑한 直流 電流가 흐른다고 假定하면, 各 相電流는  $0 \rightarrow I, I \rightarrow 0, 0 \rightarrow (-I)$  등의 階段들로 構成된다. 週期的이므로, 여러 가지의 크기와 周波數가 다른 正弦波로 分解될 수 있다. 이 境遇 存在하는 高調波들은  $(6n+1)$  또는  $(6n-1)$



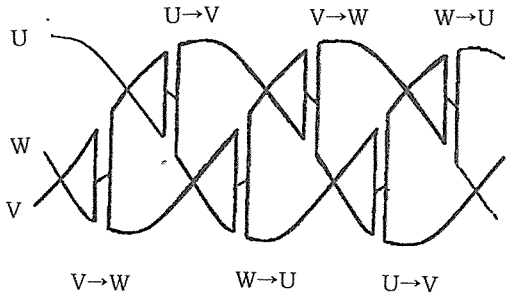
(그림 7) 回路와 電流 波形 (6 펄스 SCR)

周波數 들이며, 基本波에 대한 比率은 다음과 같다. 비록 人力端子에서 完全한 正弦波 電壓을 갖

더라도, 非線形 負荷들은 高調波 電流을 흘린다. 또한 SCR 負荷의 境遇, 한 SCR로 부터 다른

高調波 次數 (m)	5	7	11	13	17	19	23	25
高調波 電流 (I <sub>hm</sub> )의 基本波에 대한 %	20	14	9	8	6	5	4	4

SCR로 轉流(commutation)時에 每 週期마다 6 回의 相間 短絡이 생기며, 이로 因하여 電壓 波形에 노치(notch)를 만든다.



(그림 8) 每 週期當 6回의 轉流 現象과 노치(notch)

### 3.2 高調波 電流의 問題點

非線形 負荷들에 의해 흐르는 高調波 電流가 일으키는 問題點들은 다음과 같다.

#### 3.2.1 發電機와 全線에서 追加的인 銅損을 일으킨다.

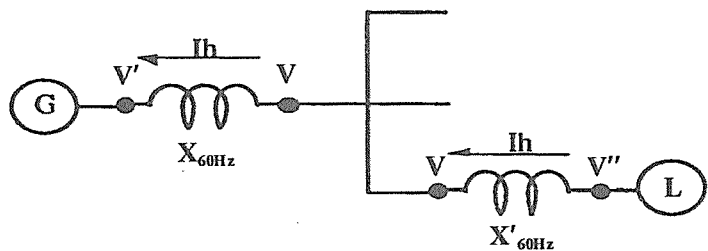
예를 들면, 發電機의 中性線을 利用하여 單相 負荷인 가스 放電燈이 100%의 負荷로 連結된 境遇,  $I_{h3}=0.3$  으로 各 相에 基本波의 30%에 해당하는 第3 高調波 電流가 흐른다. 中性線에서의 第3 高調波 電流는  $3 \times I_{h3}=0.9$  가 되며, 基本波와 거의 같은 크기이다. 이것은 供給電源의 波形에 第3 高調波가 전혀 없는 韓國電力 電源 또는 2/3 捲線 配切의 發電機인 境遇에 適用되며, 그렇지 않은 境遇에는 狀況이 더 惡化된다.

이와 같은 過度한 第3 高調波에 因하여 追加的인 銅損이 發生한다.

#### 3.2.2 高調波 電壓의 發生

$$V'_{hm} = 0, V_{hm} = m \times X_{60Hz} \times I_{hm},$$

$$V''_{hm} = m \times (X_{60Hz} + X'_{60Hz}) \times I_{hm}$$

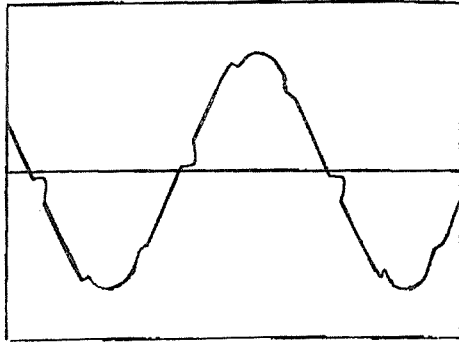


(그림 9) 發電機와 高調波 負荷의 等價 單線圖

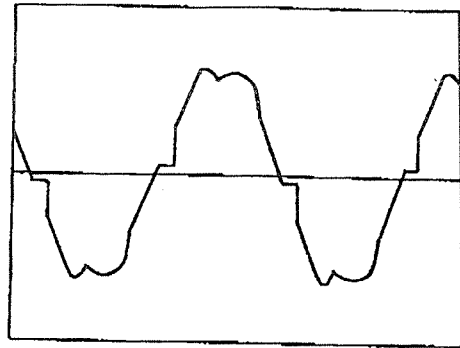


非線形 負荷는 正弦波가 아닌 低周波數(高調波 3, 5, 7, ... )와 高周波數(電流시의 노치와 같은)의 高調波 電流를 發電機로 부터 要求한다.  
非線形 負荷에 의해 흐르는 高調波 電流는 發電

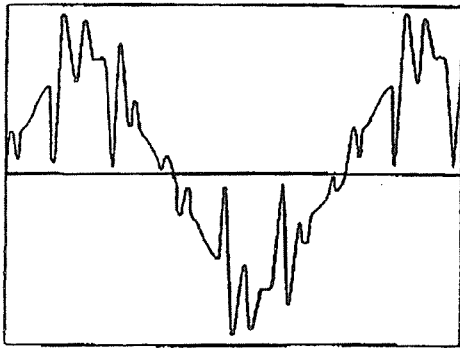
機의 内部 리액턴스의 兩端에서 高調波 電壓降下를 일으키며, 이는 發電機의 出力電壓(원래는 正弦波였던)에 高調波 電壓을 重疊시켜서 電壓 波형을 찌그러지게 만든다.



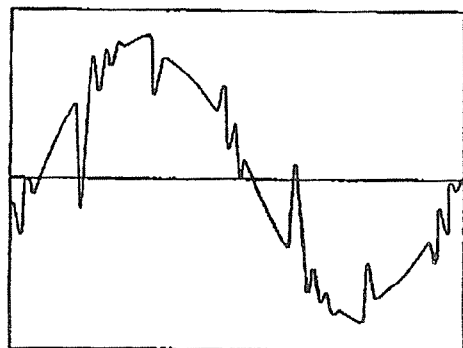
750kW 發電機+375kW 整流器 負荷



750kW 發電機+375kW 整流器 負荷



250kVA 發電機+200kVA SCR 負荷



250kVA 發電機+27kW SCR 負荷

(그림 10) 高調波 負荷時 發電機 端子 電壓 波형의 例

이 高調波 電壓들은 다음과 같은 問題들을 일으킬 수 있다.

- 發電機와 다른 電動機들의 鐵損을 增加시킨다.
- 各種 計器류의 誤差를 增加시키거나 故障를 招來할 수 있다. 可動鐵片型 計器 또는 大部

分の 디지털 計器들의 境遇, 40%의 誤差를 表示할 수도 있다. 참 實效值(true RMS) 計器를 使用해야만 精確한 表示가 된다.

- 照明이 깜박거릴 수 있다.(flicker 現象)
- 電力線 周圍에서 EMI(電磁波 障礙)를 招來할 수 있다.

- 頻繁한 높은 電壓의 過渡 現象과 急激한 上昇率에 의해, 發電機 固定子 捲線의 絶緣이 劣化될 수 있다.
- 電壓의 過渡 現象 때문에 竝列로 運轉 중인 다른 SCR裝置의 점호(firing)回路가 誤動作 할 수 있으며, 다른 SCR 裝置들도 連繫的으로 誤動作 할 수 있다.
- 全體 系統에 存在하는 3개의 制御器들(發電機用 엔진의 調速機(governor), 發電機의 自動電壓調整器(AVR), SCR 裝置의 制御器) 間에 電壓, 電流, 周波數 등이 同時에 脈動하는 制御루프의 不安定이 發生할 수 있다.

$I_{hm}$ 이  $m$ 次 高調波 電流의 基本波 電流에 對한 相對的인 크기라면,

$$THCD = \sqrt{\sum I_{hm}^2}$$

( $m$ 은 高調波의 次數,  $m > 1$ )

6 펄스 SCR인 境遇,  $THCD = 0.3$ (理論值),  $0.22$ (實際值)이다.

電流의 棼 實效値는  $I_{RMS} = \sqrt{(1 + THCD^2)}$  이며, 6 펄스일 때  $I_{RMS} = 1.024$  이다.

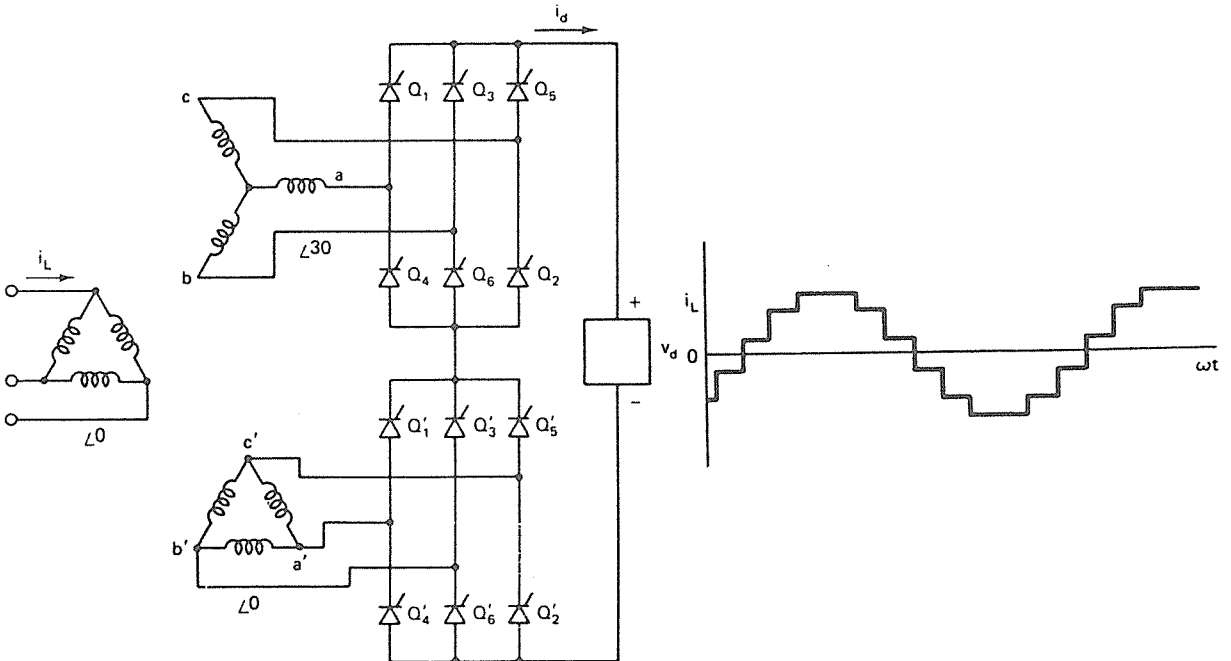
### 3.3 高調波에 對한 計算

#### 3.3.1 總合 高調波 電流 歪形率(Total Harmonic Current Distortion : THCD)

#### 3.3.2 總合 高調波 電壓 歪形率(Total Harmonic Voltage Distortion : THVD)

$$THVD = \sqrt{\sum V_{hm}^2} = \sqrt{\sum (m \times X_{60Hz} \times I_{hm})^2} = X_{60Hz} \times \sqrt{\sum (m \times I_{hm})^2} \quad (m > 1)$$

단,  $X_{60Hz}$  = 電源側의 리액턴스



(그림 11) 回路와 電流 波形(12 펄스 SCR)

6 펄스 SCR인 境遇, THVD=無限大(理論值)이지만, 實際 回路속에는 필터 成分들이 있기 때문에 25次 또는 31次 까지의 高調波들만을 考慮하면 된다. 따라서, 實用的인 THVD 값은  $1.4 \times X_{60Hz}$ 이다.

12 펄스 SCR 또는 通信用의 6 펄스 無停電 電源裝置(UPS)의 境遇,  $THVD=0.7 \times X_{60Hz}$ (實際值)이다.

電壓의 棼 實效值는  $V_{RMS} = \sqrt{(1+THVD^2)}$  이며, 6 펄스일 때  $V_{RMS}=1.015$  이다.

### 3.4 發電機에서의 計算

$X_{60Hz}$ 의 값은 다음의 data들을 利用하여 決定한다.

- 1) 該當되는 發電機의 카타로그상의 標準값인  $X_{dn}''$ (直軸 次過渡 리액턴스)
- 2) 實際 運轉電壓  $V_L$ 과 發電機의 카타로그상의 定格電壓  $V_n$
- 3) 發電機의 카타로그상의 定格出力  $S_n$ 과 全體 高調波 負荷  $S_L$

$$X_{60Hz} = X_{dn}'' \times \left(\frac{U_n}{U_L}\right)^2 \times \left(\frac{S_L}{S_n}\right)$$

$U_L=U_n, S_L=S_n$ 인 境遇에는  $X_{60Hz}=X_{dn}''$ 이다.

단,  $X_{dn}''$ : 電源側 發電機의 不飽和 次過渡 直軸 리액턴스(Unsaturated subtransient direct axis reactance)

### 3.5 發電機의 리액턴스

發電機의 리액턴스들은 嚴密하게 말하면, 一定한 값이 아니며, 電流와 그에 따른 鐵心의 飽和 程度에 따라 變한다.

#### 3.5.1 不飽和 (Unsaturated)

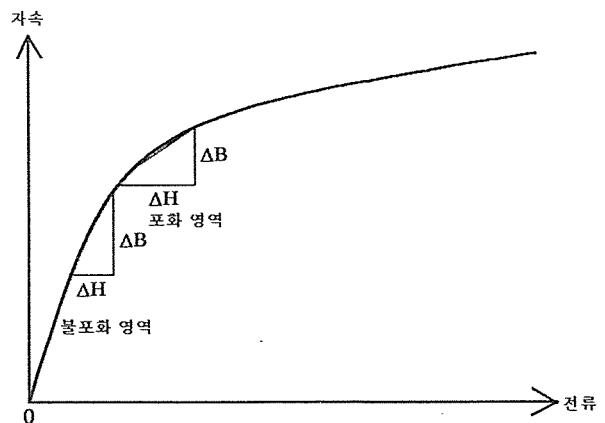
定格보다 낮은 電壓을 加하여, 定格電流보다 작은 電流를 흘리면서, 리액턴스들을 測定할 때, 磁氣回路는 飽和되지 않는 狀態이므로, 不飽和라고 表示한다.

高調波 電壓과 電流들의 크기는 定格値보다 낮은 값들이기 때문에, 바로 이 不飽和  $X_d''$  값을 使用하여 解析한다. 또한 負荷變動이나 電動機 起動時의 負荷容量이 發電機의 定格容量보다 낮거나 비슷한 크기인 境遇에도 바로 이 不飽和  $X_d''$  값을 使用하여 過渡 電壓 變動率 等を 計算한다.

#### 3.5.2 飽和(Saturated)

定格電壓을 加하여, 定格電流보다 큰 電流를 흘리면서, 리액턴스들을 測定할 때, 磁氣回路는 飽和되는 狀態이므로, 飽和라고 表示한다.

磁氣回路가 飽和되는 領域에서는 인덕턴스 ( $L$ ) =  $(\Delta B / \Delta H) = (\Delta \Phi / \Delta I)$ 이 작아지므로, 인덕턴스, 卽 리액턴스들의 값이 작아진다. 즉, 同一한 發電機에서 리액턴스의 飽和値와 不飽和値는 다르게 表示된다.



(그림 12) 發電機 鐵心의 飽和 曲線

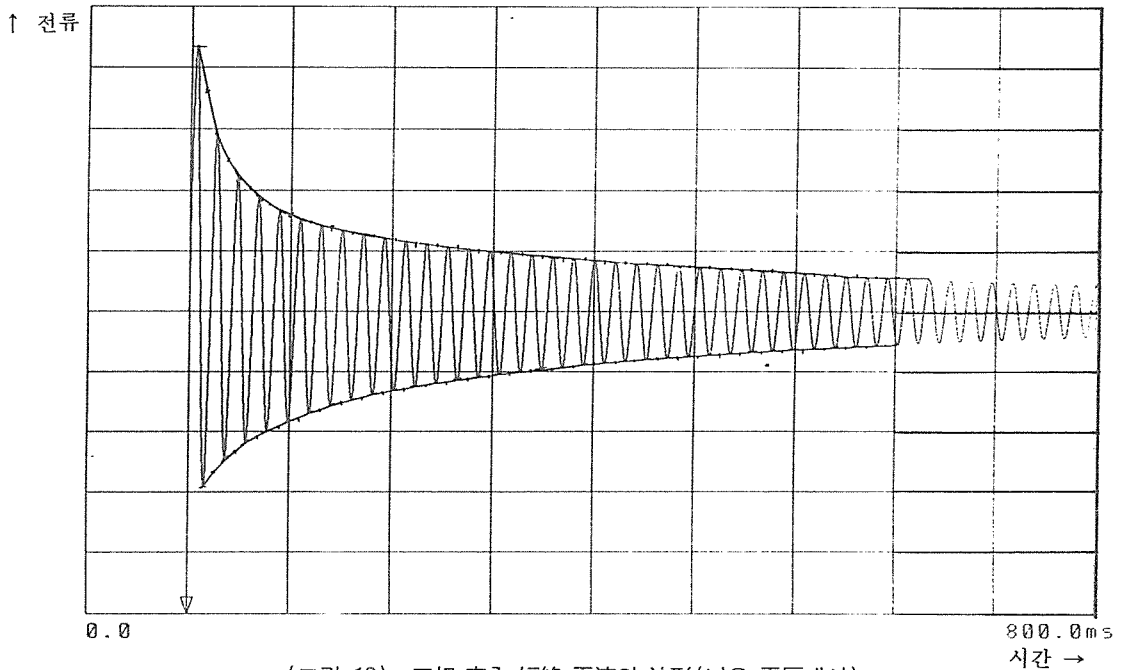
### 3.5.3 不飽和와 飽和의 比較

永久 持續 短絡 電流는 일반적으로 定格電流보다 낮기 때문에, 飽和의 影響을 거의 받지 않으므로, 同期 리액턴스인  $X_d, X_q$ 는 不飽和치로 取扱된다.

그러나, 過渡, 次過渡 리액턴스들의 境遇에는 飽和值와 不飽和值를 區分할 必要가 있다. 過渡, 次

過渡 리액턴스들을 測定하기 위하여 다음의 두가지 方法을 使用할 수 있다.

- 1) 發電機의 溫度 上昇을 考慮하여, 短絡 電流의 크기가 定格 電流보다 相當히 작도록 定格보다 대단히 낮은 電壓에서 三相 突入 短絡 試驗을 한다. 이 境遇 不飽和值가 測定된다.



(그림 13) 三相 突入 短絡 電流의 波形(낮은 電壓에서)

- 2) 發電機의 定格 電壓에서 三相 突入 短絡 試驗을 할 境遇, 短絡 電流의 크기가 定格 電流보다 相當히 크게 된다. 이 境遇 飽和值가 測定된다.

直軸 次過渡 리액턴스 ( $X_d''$ )의 境遇에 恒常 飽和值는 不飽和值보다 작은 값이며, 一般的으로, (不飽和值  $\times 0.8 =$  飽和值)이다.

다른 發電機 製造者間에 直軸 次過渡 리액턴스 ( $X_d''$ )의 값을 아래와 같이 同一한 값인 10%로 提示한 境遇, 不飽和值를 提示한 쪽의 實際의인  $X_d''$  값이 더 작으므로, 電壓 歪形率/電壓 降下率 등에서 더 優秀하다고 볼 수 있다. 따라서,  $X_d''$  값을 檢討할 境遇, 不飽和인지 飽和인지를 반드시 確認할 必要가 있다.

	製造者 A	製造者 B
飽和 條件	$X_d'' = 10\% \times 0.8 = 8\%$	$X_d'' = 10\%$
不飽和 條件	$X_d'' = 10\%$	$X_d'' = 10\% / 0.8 = 12.5\%$

### 3.6 適한 THVD의 값

어느水準의 THVD가 너무 많은 문제를 일으키지 않으면서 採擇 가능한가? 系統 (SCR 制御, 調速機, ...)의 多樣性, 高調波의 量, 力率角, 實際現場의 대단히 多樣한 임피던스 등 때문에 쉽게 對答하기는 어렵다.

그러나, 經驗과 慣例에 의하면, 다음과 같다.

- 1) 通信用 : THVD가 10%以下인 境遇에는 전혀 問題가 없지만 15%를 超過하면 困難하다.

獨逸, 스페인 텔레콤의 境遇,  $X_{dn}'' \leq 12\%$  卽, THVD  $\leq 8.4\%$ 를 採擇하고 있으며, 프랑스 텔레콤의 境遇,  $X_{dn}'' \leq 7\%$  卽, THVD  $\leq 4.9\%$ 를 採擇하고 있다.

- 2) 産業用 : THVD가 15%以下인 境遇에는 전혀 問題가 없지만 30%를 超過하면 困難하다. 한 例로, 프랑스 電力廳(EDF)는 需要者에게 電氣를 供給할 때, THVD  $< 8\%$ 를 保證한다. 英國의 境遇, 다음과 같이 高調波를 規制하고 있다.

系統 電壓	THVD (%)	個別 高調波 含有率 (%)	
		基數 高調波	偶數 高調波
415V	5	4	2
6.6, 11kV	4	3	1.75
33, 66KV	3	2	1
132kV	1.5	1	0.5

韓國電力의 境遇에도 비슷한 基準을 適用하고 있다.

### 3.7 適한 發電機의 選定

高調波의 問題를 解決하기 爲하여 適한 發電機를 選定하는 方法을 說明한다.

#### 3.7.1 中性點을 連結해야 할 境遇

제 3 高調波의 問題를 避하려면, 다음의 두가지 중 하나를 實行한다.

- 1) 2/3 捲線 피치의 發電機를 使用할 必要가 있다. 그렇지 않으면, 中性線의 電流가 定格 電流 以上으로 增加할 수도 있다.
- 2) 發電機와 負荷의 사이에 델타/와이 ( $\Delta/Y$ ) 結線의 變壓器를 設置한다.

#### 3.7.2 發電機의 리액턴스

電壓 波形의 찌그러짐 問題를 避하려면, 發電機의 리액턴스를 작게 하면 된다. 한편 經濟性을 考慮하여 얼마나 작게하느냐 하는 것이 問題이다.

- 1) 가장 簡單하게 말할 수 있는 方法은 發電機

의  $X_{60Hz}$ 을 韓國電力 電源의  $X_{60Hz}$ 과 같게 選定하는 것이다. 즉,  $X_{60Hz}$ 를 (3-5%)로 하면, THVD=4.2% - 7%가 되어 어떠한 高調波의 問題도 없다. 그러나, 發電機의  $X_{dn}$ 이 一般의 15~20%인 것을 考慮할 때, 發電機의 出力을 1/3~1/5로 低減해야 하는 非經濟的인 現實에 부딪히게 된다.

- 2) 두 번째 생각은 앞에서 言及한 經驗과 慣例에 따라서,  $X_{60Hz}$ 를 10%로 얻기 위하여, 發電機의 出力을 약 1/1.5~1/2로 低減하는 것이다.
- 3) 세 번째, 만약 系統의 모든 構成 要素들에 대한 아래의 情報들을 갖고 있다면, 精確한 設計를 통하여 發電機의 出力을 덜 低減할 수 있으며, 더 經濟的인 選定을 할 수 있게 된다.
  - ① 負荷의 單線圖(變壓器의 結線과 規格, 各 負荷의 規格 包含)
  - ② 單線圖上의 임피던스(發電機와 變壓器間의 配線, 變壓器, 變壓器와 各 負荷間의 配線)
  - ③ 各 高調波 負荷의 펄스 數(6 또는 12)와 高調波 分布
  - ④ 系統이 特別히 要求하는 發電機의 임피던스(不飽和  $X_{dn}$ )

### 3.7.3 發電機의 損失

高調波 電流에 의하여, 發電機에는 銅損과 鐵損이 追加로 發生하며, 過渡한 溫度上昇이 일어날 수 있다. 따라서, 發電機 製造者는 追加的인 損失에 따른 發電機 出力의 低減을 考慮해야 한다. 또 는 出力의 低減을 最小化하기 위한 追加的인 冷却

設計를 해야 한다.

#### 1) 損失과 出力 計算

追加的인 損失과 이에 따른 出力의 低減을 計算하는 過程은 다음과 같다.

$S_n$  = 發電機의 定格 容量 (kVA)

$X_{dn}$  = 發電機의 不飽和 次過渡 리액턴스(p.u.)

$\eta_n$  = 發電機의 定格 效率(p.u.)

THCD = 負荷의 總合 高調波 電流 歪形率

$S_L$  = 高調波 負荷의 量(kVA)

HI = 發電機를 基準으로 한 THCD의 量

$$HI = THCD \times \left( \frac{S_L}{S_n} \right)$$

定格 損失  $\rho_n = (1 - \eta_n) / \eta_n$  (p.u.)

高調波 負荷시의 損失  $\rho_n' = \rho_n + X_{dn} \times HI^2$

따라서, 이 條件에서 發電機가 받아 들일 수 있는 實際 容量 는 다음과 같이 減少한다.

$$S_n = S_n \times \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_n'}}$$

한 例를 들면, 다음과 같다.

$S_n = 200kVA$ ,  $\eta_n = 0.9$ ,  $X_{dn} = 16\%$ ,  $HI = 30\%$ 인 境遇,

$S_n = 188kVA$ 이다. 즉, 6%의 出力이 低減된다.

#### 2) 等價 高調波 負荷

한편, 高調波 負荷의 THCD에 따라서 發電機의 損失에 미치는 影響이 다르므로, 各 高調波 負荷들이 損失의 側面에서 標準 發電機 (2/3 捲線 피치인 境遇)에 미치는 等價적인 高調波 負荷로 的 換算 計數를 다음의 表와 같이 簡便하게 取扱할 수 있다.



高調波 負荷의 種類	換算 計數	計 算 例	
		高調波 負荷 (kVA)	等價 高調波 負荷(KVA)
가스 放電燈	1.0	100	100
2펄스 SCR	1.0	150	150
6펄스 SCR	1.4	200	280
3펄스 SCR	2.0	200	400
합 計 (kVA)		650	930

위에서 얻은 等價的인 高調波 負荷(kVA)보다 該當 發電機의 許容 高調波 負荷 耐量(kVA)(發電機의 設計에 따라서, 一般的으로 定格 容量의 60-100%)이 더 크게 되도록 發電機를 選定한다.

%, 10%, 15% 또는 30%) 以下가 되도록 發電機를 選定한다.

$$I_{2eq} = I_1 \times \sqrt{\sum_n (k \times IH_n)^2}$$

$IH_n = n$ 次 高調波 成分(基本波에 대한 比率, (p. u.))

$I_1$  = 基本波 電流

$k$  = 補正 計數

### 3) 等價 逆相 電流

高調波 電流에 의한 損失을 等價적인 逆相電流 ( $I_{2eq}$ )로 換算하여, 이 값이 發電機의 連續 許容 逆相 電流(適用하는 規格에 따라서, 定格電流의 8

高調波 次數	3	5, 7	9	11, 13	17, 19	21	23, 25	27	29, 31
補正 計數 k	1.107	1.316	1.456	1.565	1.732	1.800	1.861	1.917	1.968

### 3.7.4 發電機의 AVR(自動電壓 調整器)

高調波 電壓에 의한 AVR(自動電壓 調整器)의 誤動作을 다음과 같이 防止해야 한다.

- 1) 電壓 檢出回路에서 三相 檢出을 하고, 三相 全波整流後, 多重 필터回路를 使用하여 平均 値를 檢出하는 方法을 使用하면, AVR(自動 電壓 調整器) 制御回路에 對한 高調波의 影響을 除去할 수 있다.
- 2) 勵磁回路에서 交流를 直接 直流로 變換制御 하는 經濟的인 SCR方式을 使用하면, 高調波의 影響을 쉽게 받을 수 있으며 誤動作을 할 수 있다. 그 대신에 交流를 다이오드로 整流

하여 直流로 變換한 뒤, 필터回路로 平滑하게 하고, 트랜지스터를 使用하여 스위칭 方式으로 勵磁電力을 供給하면, 勵磁回路는 高調波의 影響을 전혀 받지 않는다.

- 3) 勵磁 電源을 發電機의 固定子 捲線과 電氣的으로 絶緣하면, 高調波의 影響을 덜 받게 된다. 이 方法들로는 補助捲線(Auxiliary Windings), 絶緣變壓器 (Isolation Transformer) 또는 永久磁石 補助 發電機 (PMG : Permanent Magnet Generator) 등이 있다.

- 4) 全體 系統의 制御 安定度を 保障하기 爲하

여, 發電機 AVR(自動電壓 調整器)에 優秀한 性能의 PID(比例 積分 微分) 制御器가 準備되어 있어야 한다.

### 3.7.5 發電機 製造者의 기타 考慮 事項

發電機 自體의 高調波 電壓을 줄이기 위하여, 다음의 여러 가지 要素들을 變更할 수 있다.

- 1) 願하는 磁束의 波形을 얻기 위한 磁氣回路의 形象 設計
- 2) 最適의 捲線 匹치와 스큐(skew) 角度의 設計
- 3) 效果的인 制動捲線(damper winding)의 設計

## 3.8 實際 適用 例

### 3.8.1 電動機 制御裝置 負荷에의 適用

#### 1) 負 荷

電動機들은 6 펄스 SCR 人力의 인버터에 의하여 驅動된다.

- 電動機 1 : 3000HP 6.6kV
- 電動機 2 : 3750HP 6.6kV

#### 2) 發電機의 容量 選定 :

3000HP+3750HP=6750HP의 出力인 1臺의 電動機에 該當하는 6 펄스 SCR 負荷를 基準으로, 發電機의 容量을 選定한다.

- 電動機들의 機械的 出力=6750HP=5035.5kW (1HP=0.746kW)
- 電動機들의 效率=96%
- 인버터의 效率=95%
- 인버터의 人力 力率=0.8(發電機와 電動機가 直接 連結되지 않으므로, 電動機의 力率은 發電機의 容量 選定에 있어서 重要하지 않다.)

- 發電機의 電氣的 出力=(電動機의 機械的 出力)/(電動機의 效率×인버터의 效率)=  
5035.5kW/(96%×95%)=5521kW
- 發電機의 要求 容量=5521kW/(0.8)=  
6901kVA

#### 3) 發電機의 機種 選定

向後의 負荷增加 等を 考慮하여 發電機의 容量에 약 30%의 餘裕를 두어, 5521kW×1.3=7177kW≒7200kW=9000kVA를 選定한다.

인버터의 人力部 回路는 6 펄스 SCR 方式이므로,  $X_{d\prime\prime}=12\%$  로 選定한다.

實際 SCR 負荷의 條件인 6750HP 電動機의 發電機로 換算한 電氣的 負荷는 6901kVA이므로,  $THVD=1.4 \times 12\% \times \{(6901kVA)/(9000kVA)\}=12.9\%$ 로서, 産業用의 安全한 基準인 15% 以下이므로, 大단히 安全한 選定이다.

한편 이 發電機( $X_{d\prime\prime}=12\%$ , 7200kW, 9000kVA)는  $X_{d\prime\prime}$ 의 制限 條件을 없앨 境遇, 13182kW, 16448kVA ( $X_{d\prime\prime}=22.0\%$ )의 出力을 낼 수 있는 大단히 餘裕 있는 容量을 갖는다.

### 3.8.2 通信用 負荷에의 適用

通信用 整流器와 UPS用으로 適用된 發電機(3750kVA, 3000kW, 3300V, 60Hz, 不飽和  $X_{d\prime\prime}=12.0\%$ )에 對하여, 12 펄스 SCR의 100% 負荷 試驗을 實際로 한 結果는 다음과 같다.

$THVD=0.78\%$ (無負荷時),  $10.4\%$ (負荷時)

이 發電機는 通信用으로 現在 使用 中이며, 아무런 高調波의 問題도 없다.

## 4. 結 論

發電機를 中心으로 高調波의 問題를 檢討해 보



았다. 이미 高調波의 問題가 發生한 뒤에는 그 對策을 세우기 위하여 많은 時間, 勞力, 費用, 生産의 損失 등이 發生하게 된다. 따라서, 發電機의 設置를 計劃하는 初期 段階부터 高調波의 問題를 充分히 檢討할 必要가 있다. 配電 系統 全體의 精密한 高調波 分析은 別途의 소프트웨어나 專門家들의 도움을 받아야 하겠지만, 가장 核心的인 要素인 發電機의 技術 檢討는 本稿의 內容에 따라서 實用的으로 할 수 있을 것이다.

특히 低壓 發電機의 境遇에는 三相 四線式의 配電方式에 의하여 中性線을 大部分 活用하고 있으며, 高調波를 考慮하여 特別히 製作할 境遇 納期와 價格面에서 非經濟的일 수 있기 때문에, 國內의 發電機 業體들도 標準品의 規格을 2/3 捲線 피치+낮은  $X_{dn}$ +높은 許容 高調波 負荷 耐量의 方向으로 上向 調整하여 國際的인 性能을 確保할 必要性이 增加하고 있다.

