

□ 技術 解 說 □

# 可變速度入力—固定周波數出力 電力發電시스템

尹 明 重\*

■ 차 례 ■

- 1. 序 論
- 2. 시스템解說
  - 2.1 發電機
  - 2.2 Cycloconverter
  - 2.3 自然轉方式
  - 2.4 Feedback
- 3. 性能特性
  - 3.1 周波數制御 및 過渡現象
  - 3.2 電壓過渡現象
  - 3.3 直流成分
- 4. 結 論
  - 參考文獻

## 1. 序 論

現代의 航空機에서는 三相, 400 Hz의 電力을 必要로 하고있다. 그러나 航空機의 엔진은 幅넓은 速度範圍에서 動作되고 있기 때문에, 엔진에 依해서 驅動되는 同期發電機는 可變周波數 出力을 發電한다. 現在 使用되고 있는 大部分의 航空機 電氣시스템은 發電機速度를 一定하게 維持하기 爲하여 hydro-mechanical transmission을 使用하고 있다.

1960年頃에 더욱 信賴性이 높은 400 Hz 航空機 電力시스템의 必要性이 擡頭됨에 따라, 美海軍에서는 cycloconverter를 使用한 可變速度入力—固定周波數出力 電力發電시스템 (Variable Speed Constant Frequency System)의 開發을 支援하였고, General Electric 시스템 設計者들은 中間에 直流 link가 必要없이 可變周波數 交流를 固定周波數 交流로 一段階에서 變換시켜 줄 수 있는 cycloconverter의 有利한 點을 認識하게 되었다.

Cycloconverter는 새로운 것이 아니며, 1930年 年代 初盤에 獨逸의 鐵道網에서는 電鐵用 電動機를 驅動하기 爲해 水銀整流器를 스위치로 利用해서 50 Hz의 電力을 16 2/3 Hz로 바꾸어서 이미 使用하였다. 그러나, 1958年에 SCR (Silicon Controlled

Rectifier)이 紹介된 以後에야 cycloconverter의 航空機 使用이 考慮되었다. 1960年代에는 여러會社에서 開發을 서둘렀으며, 마침내 1972年에 General Electric에서 처음으로 本格的인 生産에 들어가게 되었다.

## 2. 시스템 解說

可變速度入力—固定周波數出力 電力變換시스템 (VSCF System)은 부라쉬가 없는 發電機와 半導體部品을 使用한 周波數 變換器, 制御裝備 및 保護裝備로 構成되어 있으며 그림 1에서 보는 바와 같다. 發電機는 直接 엔진의 補助軸에 連結되어 있으며, 一般적으로 2對1의 速度範圍에서 動作되고 있다. 이 發電機는 可變周波數 電力을 固定된 三相 400 Hz의 電力으로 變換시켜 주는 3個의 同一한 cycloconverter에 可變周波數入力を 傳達한다. 各個의

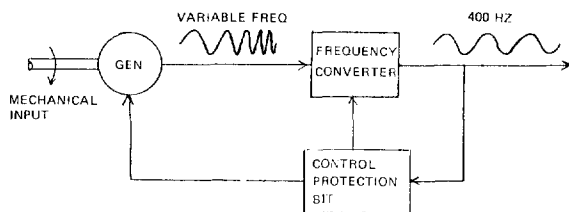


그림 1. Simplified diagram of VSCF system

\* 正會員: 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科 助敎授 · 尹博

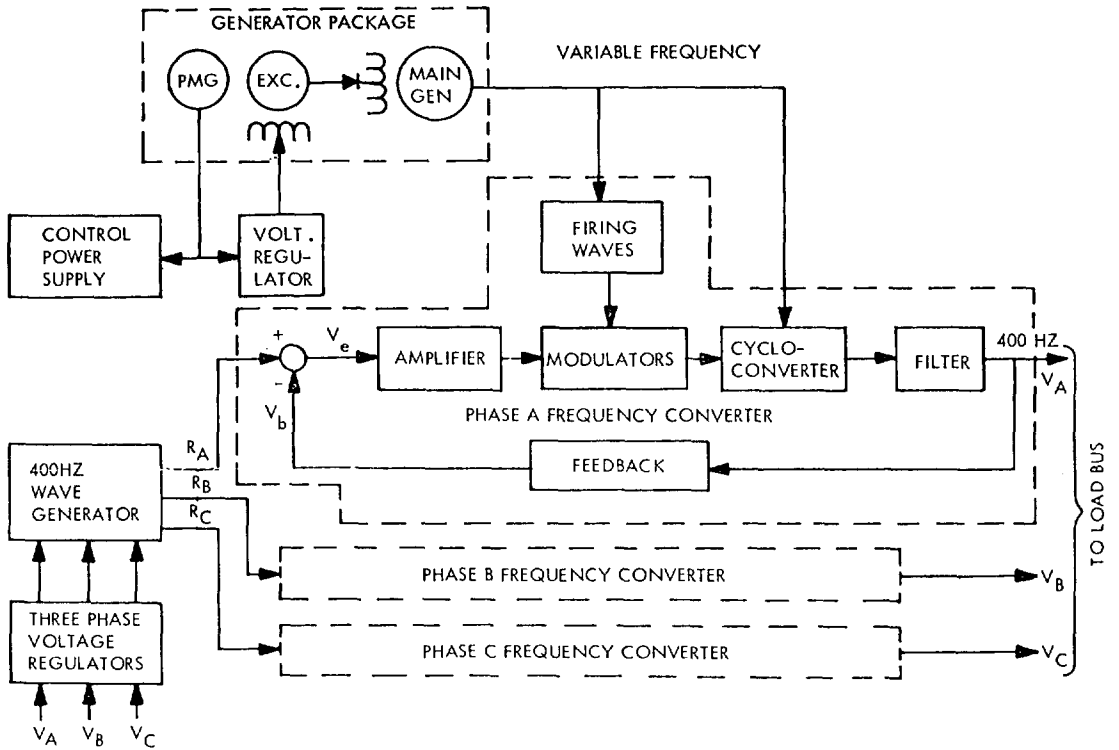


그림 2. Block diagram of VSCF system

cycloconverter 에는 ripple frequency 成分을 除去하기 爲한 filter 가 連結되어 있으며, 400 Hz 의 出力波形을 形成하기 爲하여 modulator 로 부터 나오는 信號로 作動되는 12個 乃至 18個의 SCR 로 構成되어 있다.

이 modulator 는 400 Hz reference 波形과 發電機로 부터 誘導되는 firing 波形을 比較해서 適切한 SCR 의 gating 順序를 定한다.

三相 400 Hz 의 reference 波形( $R_A$  와  $R_B$  및  $R_C$ ) 은 120 度の 位相差를 갖고 있으며 0.5% 보다 적은 高調波 歪形率을 가지고 있다. 이러한 波形은 石英水晶振動器와 디지털 波形發電機로 부터 만들어 진다. 出力電壓波形 ( $V_A$  와  $V_B$  및  $V_C$ ) 은 cycloconverter 의 線型性을 增進시키고, 出力임피던스를 줄이기 爲해서 reference 波形과 比較된다. 따라서 歸還回路가 있는 cycloconverter 는 一種의 高性能 增幅器이며, 電力水準이 한결 높은 reference 波形을 複寫한 出力波形을 만들어 낸다. 또한 400 Hz 出力電壓은 400 Hz reference 波形의 振幅을 調節하는 各個의 位相電壓調整器에 依해서 調整된다.

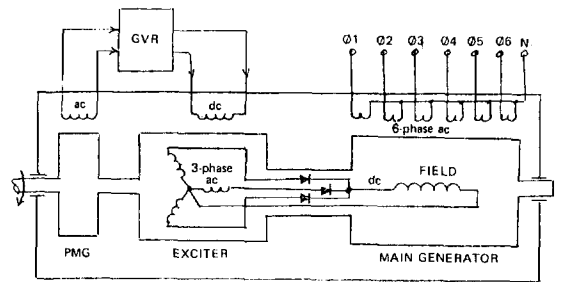


그림 3. Simplified generator circuit

### 2.1 發電氣機

主發電機는 卷線型 回轉子를 갖고 있으며, 부라쉬가 없는 凸極 同期發電機이다. VSCF 시스템에서는 一般의로 定格容量이 60 KVA 까지는 六相 出力이 使用되고, 定格容量이 60 KVA 가 넘으려는 九相 出力이 使用된다. 發電機 周波數는 엔진速度範圍와 시스템 定格容量에 따라서 決定되는데 一般의로 1000 Hz 에서 3500 Hz 範圍안에 있다. 發電機의 周波數와 出力의 相數는 電氣的인 性能과 무게를 考慮해서 選擇된다.

이러한 發電機는 높은 發電機 周波數에서 發生되

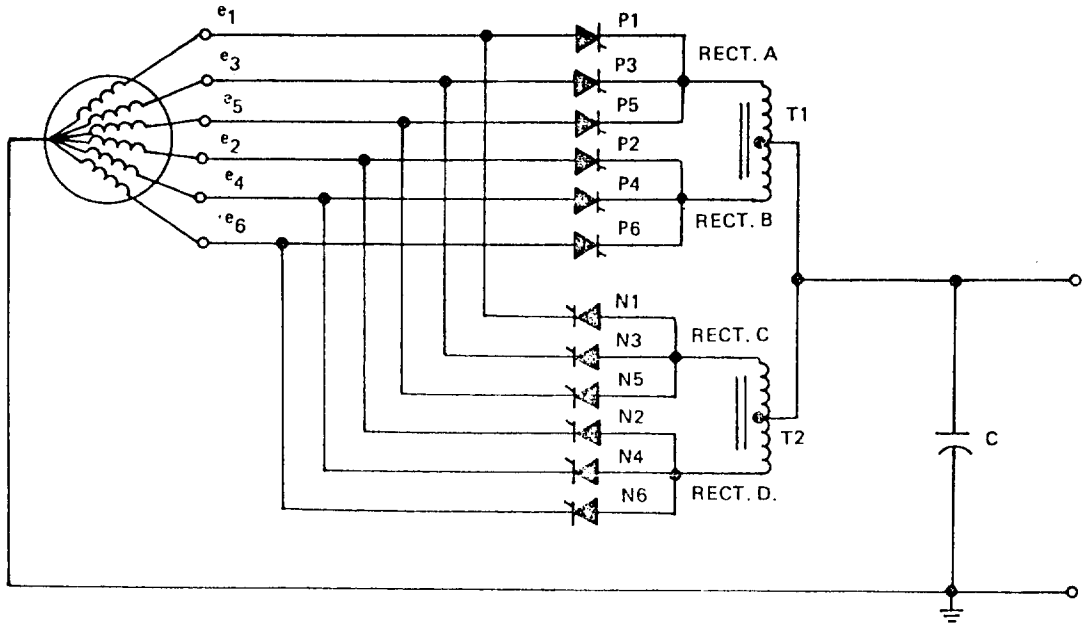


그림 4. Cycloconverter circuit

는 鐵損과 銅損을 줄이기 爲한 一部分의 修正을 除外하고는 대체적으로 航空機에서 使用되고 있는 在來式 400 Hz 發電機를 만드는 것과 같은 技術을 利用하여 製作되고 있다. 또한 發電機 package 는 그림 3에서 보는 바와 같이 主發電機에 勵磁를 供給하는 勵磁機와 cycloconverter 에 制御電力을 供給하는 永久磁石發電機를 抱含하고 있다.

### 2.2 Cycloconverter

그림 4에서는 相間變壓器와 六相整流器가 連結되어 있는 cycloconverter 의 一相 出力에 對해서 보여주고 있으며 두個의 位相調節整流器뱅크가 400Hz 波形을 만들어 낸다. 두個 整流器뱅크의 gating 은 그림 5에서 보여주고 있으며 톱니모양으로 連結되어 있는 線은 發電機 母線에 連結되어 있는 整流器들의 導通期間을 表示한다. 이러한 波形은 濾波가 되지않은 두個의 整流器뱅크에서 나오는 出力들이며, 굵고 平滑한 線은 濾波가 된 cycloconverter 의 出力이다. 두個의 整流器뱅크는 出力波形의 全區間에서 gating 할 수 있도록 設計되어 있으며, 各 뱅크는 어떤 極性의 電壓도 供給할 수 있다. 出力電壓波形中 陽極쪽은 陽極뱅크를 整流 mode 로 作動시키거나, 또는 陰極뱅크를 inverting mode 로 作動시켜서 形成할 수 있으며, 電壓波形中 陰極쪽은 反對로 作動시켜서 形成할 수 있다. 整流 mode 와 inverting

mode 는 電力의 흐르는 方向을 定義하는데, 電力은 整流 mode 에서는 負荷쪽으로 흐르고 inverting mode 에서는 電源쪽으로 흐른다. 整流器뱅크를 switch 해주는 瞬間은 電流가 零으로 될때이고, 이것은 또한 負荷의 力率에 左右된다.

그림 5에서 보는 바와 같이 두個의 濾波된 出力波形은 크기와 位相이 同一하다. 整流器뱅크가 이러한 式으로 設計되어 있을 때에는 負荷電流가 한 뱅크에서 다른 뱅크로 옮겨질때 出力波形이 이그러지지 않는다. 두 뱅크 사이에서 電流가 옮겨지는 것은 400 Hz 電流가 零으로 될때이며, 電流를 옮겨주기 爲한 더 以上의 制御는 必要로 하지 않는다. Cycloconverter 는 電壓電源이고 따라서 負荷가 整流器뱅크에서 電流의 흐름을 決定한다.

SCR은 400 Hz 波形에서 高調波 成分이 最小가 되도록 導通시킨다. 그러므로 出力濾波器는 但只 整流器 ripple 周波數 成分만 除去하도록 設計가 되어 지고, ripple 周波數가 높기 때문에, 작은 出力濾波器를 使用할 수 있다. 相間變壓器에 있는 인덕턴스가 漏泄 인덕턴스의 形態로 해서 簡單한 LC 濾波器와 같이 使用된다.

### 2.3 自然轉流方式

Cycloconverter 는 直流 link 가 있는 VSCF 시스템에서 使用되고 있는 強制轉流方式(forced commu-

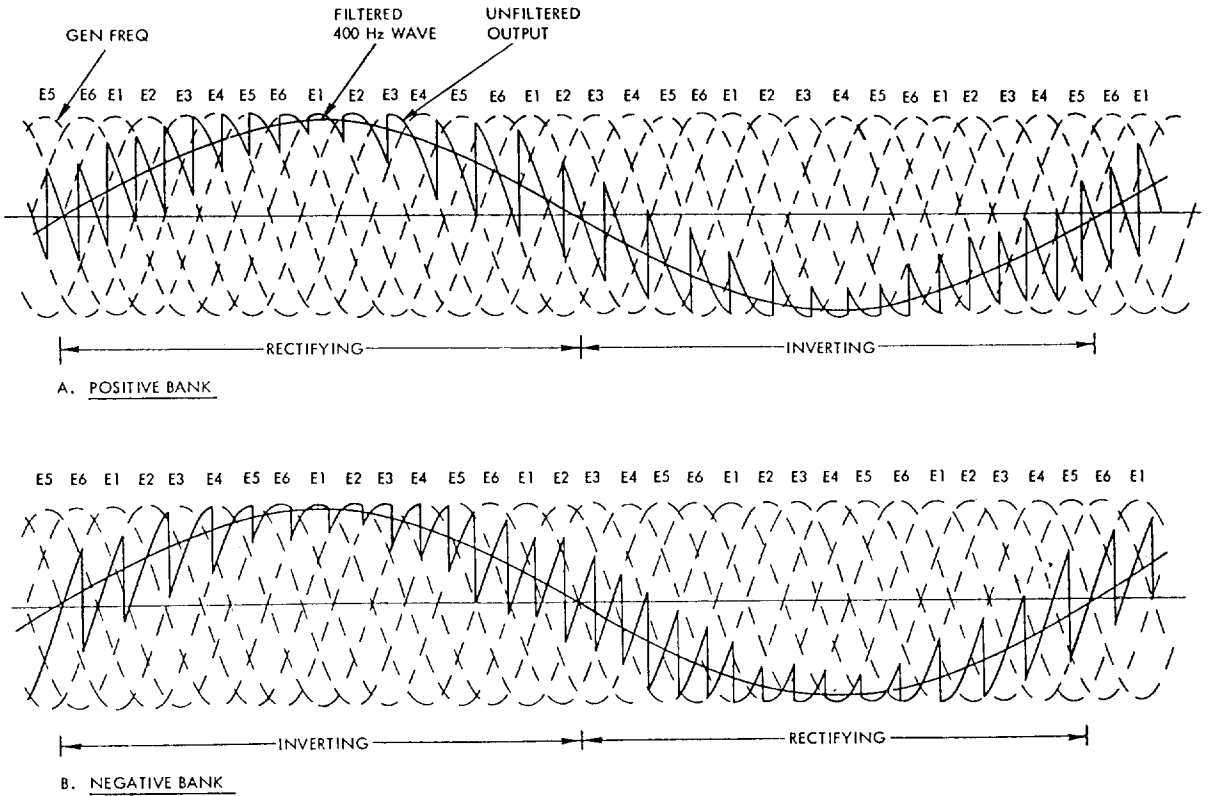


그림 5. Gating of rectifier banks

tation)과는 달리, SCR을 꺼주기 위해서 自然轉流方式 (natural commutation)을 使用한다. 自然轉流方式은 SCR에 흐르는 電流를 零으로 만들어 주고 또한 SCR이 元來의 狀態로 돌아올 수 있도록 하기 위해서, 어떤 補助 SCR이나 또는 commutating capacitor를 必要로 하지않는다. 그림 6에서는 自然轉流方式을 採할때에 일어나는 回路의 動作을 보여주고 있다. 發電機에 있는 commutating inductance 때문에 한 整流器에서 다른 整流器로 電流를 옮겨 줄때에는 一定한 時間이 必要하다. Commutating Inductance는 發電機에 있는 高周波 인덕턴스 (初期過渡인덕턴스)이다. 처음에는 SCR 1으로 負荷電流  $I_0$ 가 흐르고 있고 SCR 2는  $\alpha$ 負度에서 켜지게 되는데 이負度는 두相間의 線間電壓이 零으로 되는 點으로 부터 決定되어 진다. ( $e_2 - e_1 = 0$ ). 電壓의 極性은 commutating 電流  $i_c$ 가 그림에 表示되어 있는 것과 같이 흐르는 方向이며, 이電流는 처음부터 SCR 1에 흐르고 있는 電流  $I_0$ 와 重疊되고 SCR 1에 흐르고 있는 電流를 줄이는 方向으로 흐른다. 電流  $i_c$ 의 크기가

電流  $I_0$ 의 크기와 같을때 SCR 1에 흐르는 電流는 零으로 되고, 이때부터 SCR 2에 負荷電流가 흐르기 始作한다. 時間隔  $\mu$ 를 commutating 間隔이라고 부르며, 이 時間隔 동안에는 整流器뱅크에서 나오는 電壓은 두個 相電壓의 平均値이고 따라서 그림에서 보는 바와 같이 斜線을 친 部分만큼 出力電壓의 損失이 發生된다. 電壓의 損失은 負荷電流에 比例하며, 이것은 定速度發電機에 있어서의 電壓降下와 비슷한 것이다. 그림 6에서 굵은 線으로 表示되어 있는 것은 整流器의 出力으로 나타나는 電壓  $e_p$ 이다.

綜合해 보면, 自然轉流方式은 發電機의 電壓極性이 꺼주어야 할 SCR에 흐르고 있는 電流가 減少하는 方向으로 되었을때 다음의 SCR을 켜줌으로써 始作되는데, 이러한 現象은 다음에 켜주어야 할 SCR의 陽極電壓이 整流器出力電壓  $e_p$ 보다 클때 일어난다.

### 2.4 Feedback

Feedback 은 Converter의 線型性 (linearity)을 높이고, 出力임피이던스를 낮추기 위해서 使用된다.

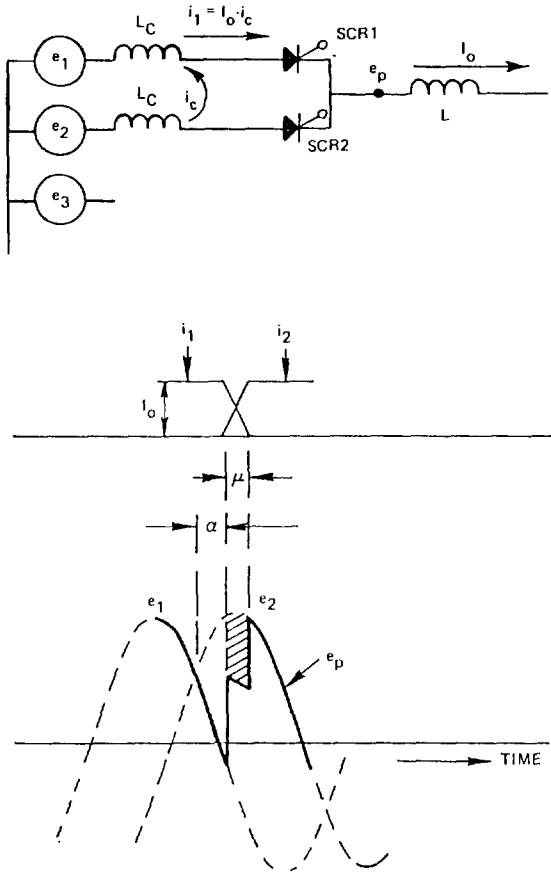


그림 6. Natural commutation

400 HZ의 出力電壓波形은 그림 7에서 보는 바와 같이 400 HZ의 reference 波形과 比較된다. 出力電壓 波形이 400 HZ의 reference 波形과 差異가 있으면, 이 差異는 誤差信號 (error signal)  $V_e$ 로 나타내 지고, 이 信號는 出力波形을 바르게 고쳐주는 方向으로 SCR을 켜주게 되는데, 이러한 것은 電力增幅 器 設計에서 잘 알려져 있는 手法이다. 그림 7에서와 같이 非線型性入力が 들어갈때 高調波成分의 減少는 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$V_n = \frac{V_n'}{1 + GH(j\omega)}$$

여기서  $V_n'$  = feedback 이 없을때  $n$ 번째 高調波 成分의 크기

$V_n$  = feedback 이 있을때  $n$ 번째 高調波 成分의 크기

$GH(j\omega)$  = 環狀利得

비슷한 方法으로, 出力임피던스는 다음과 같이 表

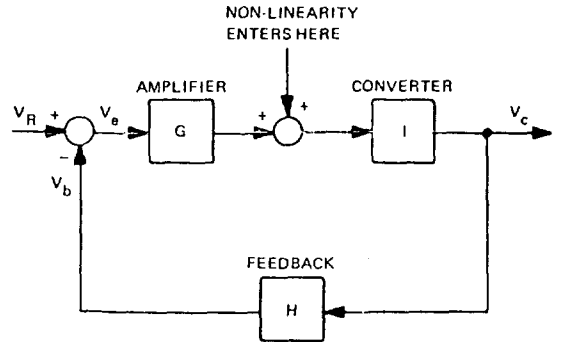


그림 7. Feedback loop for improving electrical performance

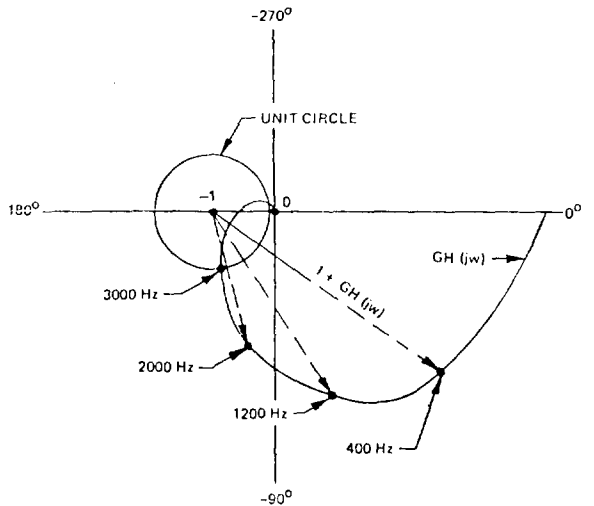


그림 8. Nyquist plot showing  $1 + GH(j\omega)$

示된다.

$$Z_0 = \frac{Z_0'}{1 + GH(j\omega)}$$

여기서  $Z_0'$  = feedback 이 없을때 出力임피던스

$Z_0$  = feedback 이 있을때 出力임피던스

낮은 出力임피던스는 電壓過渡現象, 負荷에 依해 誘導되는 高調波成分, 零相電壓 및 逆相電壓을 줄임으로써 電力의 質을 높이고 있다.

Nyquist plot 은 關心있는 周波數에서 phasor  $1 + GH(j\omega)$ 의 크기를 알아 보는데 便利한 方法이다. 그림 8에서는 40 KVA VSCF 시스템에 對한 Nyquist plot 을 보여주고 있으며, 400Hz와 1200 Hz 및 2000 Hz에 對한 phasor  $1 + GH(j\omega)$ 가 點線으로 表示되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 phasor의 길이는 周波數가 增加함에 따라서 減少하고

있으며 周波數가 3000 Hz 가 넘으려는 1 보다 작아진다. 그러므로 feedback 은 7 번째 高調波成分까지 減少시켜 줄 수 있으며, 出力 filter 는 3000 Hz 가 넘는 高調波成分 및 整流器 ripple 成分을 減少시켜 줄 수 있도록 設計가 되어야만 된다.

### 3. 性能特性

半導體部品을 使用한 電力電源은 여러가지 면에서 一般의인 發電機와 다르며, 發電機에서 供給하는 電力과 同質이거나 아니면 더 좋은 質의 電力을 供給할 수 있도록 하기 爲해서 다른 規定들을 要求하고 있다. VSCF 시스템에 對한 規定은 表 1에서 보는 바와 같으며 이 規定과 發電機에 對한 規定中 主要한 差異點은 周波數 過渡現象이 없는 細密한 周波數 調節과 짧은 電壓過渡現象期間 및 直流成分의 制限等이다.

#### 3.1 周波數制御 및 過渡現象

VSCF의 出力周波數는 發電機의 速度에 影響을 받지 않으며 converter의 出力電壓波形은 正確한 石英水晶振動器에 依해서 制御되는 400 Hz refer-

表 1. Power quality requirements

Item	Specification Limit
Voltage Regulation	
Rated Loads	115 +1.5 -1.0 volts
Overloads	115 +1.5 -3.5 volts
Voltage Transients	
Rated Loads	Rise: 135 volts Dip: 85 volts Recovery: 0.030 seconds
Overloads	Rise: 165 volts Dip: 80 volts Recovery: 0.080 seconds
Frequency Regulation	
Class A	400.00 ± 0.01 Hz
Class B	400.00 ± 0.1 Hz
Class C	400.00 ± 1.0 Hz
Waveform	
Crest Factor	1.41 ± 0.07
Distortion Factor	0.05
Distortion Spectrum	
DC Content	0.1 volt
Voltage Phase Difference	120° ± 2°

ence 波形의 複寫이다. 衝擊負荷와 入力速度變換이 水晶周波數에 影響을 미치지 않고 있으며, 또한 VSCF 시스템의 出力周波數에 거의 影響을 끼치지 않는다.

#### 3.2 電壓過渡現象

Converter 電壓調整器는 發電機의 磁界를 制御하는 것이 아니고 SCR의 gating을 制御한다. 값이 큰 磁界 時定數가 調整하는 loop에 들어가 있지 않기 때문에, loop dynamics가 빨라서 負荷를 加하고 除去할때 但只 짧은 期間동안의 電壓過渡現象만 일어난다.

#### 3.3 直流成分

SCR이 電力變換에 使用될 때에는 直流成分이 400 Hz 負荷母線에 나타날 수 있다. 이러한 直流成分은 一般의으로 적으며 (0.05 V以下) 負荷 裝備에 어떤 問題點을 주지 않는다. VSCF 시스템에서는 保護裝備가 設置되어 있으며 이 裝備는 直流成分을 만들어 주는 failure mode 동안에 負荷 裝備를 保護한다.

直流電壓이 交流시스템에서 바람직하지 못한 것은 變壓器와 같은 磁氣部品에 對한 影響때문이다. 變壓器卷線이 있는 回路에 直流電壓이 加해졌다면, 變壓器卷線 抵抗과 回路의 모든 抵抗의 合으로 直流電壓을 나눈 것과 같은 값의 直流電流가 흐른다. 이러한 直流電流는 고르지 못하고 直流電壓의 極性을 갖는 交流電壓의 半波가 끝나는 點에 集中되어 있다. 이때 變壓器는 飽和狀態로 들어가고 펄스電流가 흐른다. 이 電流의 實效値는 平均値보다 크며, 이 값은 變壓器의 飽和狀態 및 回路의 抵抗값에 左右된다. 다시 말하자면 이 값은 鐵心材料, 空隙, 卷線配置 및 回路抵抗에 依存한다. 直流成分의 影響은 심한 飽和狀態와 작은 抵抗값을 갖는 變壓器에서 가장 크다.

### 4. 結 論

Cycloconverter 回路는 可變周波數를 固定周波數로 一段階에서 變換시켜 주고, commutating 回路가 必要없는 自然轉流方式을 使用하기 때문에 VSCF 應用에는 理想的이다. SCR 스위치의 빠른 反應은 負荷를 바꾸어 줄때 電壓의 過渡現象期間을 짧게 해주며 負掃還手法은 電力의 質을 改善하고 出力임피던스를 줄여준다. < P . 8에서 계속 >