

發電機에 있어서 Brushless 勵磁方式의 問題點

技術解說

17-2-1

(Some problems on brushless exciting system of generator)

吳 炳 仁 *
(BYUNG IN OH)

1. 序 論

最近 各種 回轉電機의 設計製作에 있어서 其經濟性과 信賴性을 높이고져 可能한 限高速化 乃至는 單一化 傾向에 있다. 例로써 1,500MW 級 主發電機라던 8MW¹⁾ 라는 勵磁電力이 必要하므로 이를 從來의 直結直流勵磁機方式으로서는 整流條件에서 制限을 받게된다. 故로이러한 難問題의 解決策으로서 直流勵磁機의 減速, 別置의 M-G Set, 또는 二重電機子法等이 考案되고 있으나 亦是 過擔한 經濟問題를 隨伴하게 된다. 또한 各種産業의 發達에 따라 要求되는 負荷特性和 可酷한 環境條件에서 運轉되어야할 境遇가 增加되고 있다. 即 鹽素 Gas, 亞硫酸 Gas, 引火油氣 또는 空海上等을 莫論한 周圍條件에서 防蝕防爆의 安全性和 小型輕量化的 經濟性 등을 設計의 主要目的으로 본다. 이것은 回轉電機의 固定子 와 回轉子間에 傳達되는 電氣的 Energy가 回轉機械의 가장 弱點인 擻動部分을 通過하기 때문이다. 여기에서 擻動部를 除去할 手段으로 Brushless 勵磁方式이 考案되었으며 오래前부터 其 Idea가 創案되어 있었으나 最近 갑자기 極少容量級에서 超大容量級에 이르기 까지 Brushless化 되었음은 材料科學에서 本 磁氣增中器 또는 半導體工學의 發達이 크게 影響하였다. 筆者는 여기에 發電機를 中心으로 Brushless 勵磁方式의 種類와 問題點을 檢討하여 今後 發展될 展望에 對하여 簡單히 論한다.

2. Brushless 勵磁方式의 特徵

整流器勵磁方式이란 構造上 各種方式에 依하여 開發 또는 實用化되고 있으나 이를 大別하여

- (i) Static excitation 方式(自勵型)
- (ii) Brushless 勵磁方式(回轉整流器型)
- (iii) 交流勵磁方式(交流勵磁機와 SR 混合型)
- (iv) Thyristor 勵磁方式(Thyristor Control 型)
- (v) Exciterless 方式(Harmonics Generation)

等으로 研究되고 있으나 어느것이나 勵磁用 電氣的 Energy를 供給하는데 基本原則으로써

- (i) 勵磁 Energy를 供給하는 電源의 信賴性이 클 것.
 - (ii) 勵磁電力 制御系統의 Response가 速할 것.
 - (iii) 勵磁電力을 制御하는데 必要한 Energy가 적을 것 등이 設計上 重要한 考慮對象으로 되어있다.
- 또한 Brushless 發電機로서는 從來의 自勵複卷發電機나 直流勵磁機付交流發電機에 比하여 다음과 같은 特徵이 있다.

(i) 運轉維持, 保守가 簡便하다.

整流子, Slipring, Brush, 그리고 界磁遮斷器等이 完全히 除去되므로 部品의 交換, 保守, 點檢, 調整等의 手工이 節減된다.

(ii) 運轉에 信賴性이 높다.

電氣的인 擻動部의 省略으로 突發事故發生率이 大幅減少되며 磨耗된 炭素粉과 銅粉이 卷線의 絕緣에 被害를 주지 않는다. 또한 溫氣와 有害 Gas의 腐蝕과 爆發事故發生率이 減少되며 整流의 制限이 없으므로 機械의 高速輕量化和 Liquid Cooling 方式 등이 採用될 수 있다

(iii) 通信障目的의 減少,

Brush의 擻動部에서 發生하는 flash over 와 接觸不良의 憂慮가 없으므로 有無線通信에 障目的이 減少된다.

(iv) Quick Response.

多段直流勵磁機에 比하여 速應度가 높으며 過渡安定度와 定態安定度가 높게 된다.

(v) 機械的으로 堅固하며 Base의 簡便.

全體的인 發電機의 長이가 短縮되므로 軸의 強度가 增加됨과 同時에 振動에 對한 耐性이 크고 臺床面積이 縮少된다.

(vi) 豫備用 勵磁機와 容量에 制限이 없다.

回轉整流素子의 增加만으로 裕度와 安全度를 向上시킬 수 있으므로 別途로 豫備機는 不必要하다. 또한 各種卷線, 增巾器 그리고 調整器等に 電氣的 制限이 없으므로 主機에 對한 軍機容量이 增加된다.

(vii) 設計製作의 經濟性

構成材料의 節減, 製作工程의 簡易, 製作工期의 短縮等의 經濟的 製作과 運轉維持에도 簡便하다.

3. Brushless 發電機의 種類와 構成概要

發電機에 있어서 Brushless 勵磁方式는 自動型과 他勵型單相과 多相出力, 혹은 交流와 直流等 多種多樣한 方式이 考案 또는 實用化되어 있으며 原理的으로 大同小異하나 特性에 差異가 있어 이를 明確히 分類說明하기는 困難하나 다음 몇가지 方式을 解說코져 한다.

3. 1. P.M.G.

電氣的인 擡動部를 除去할 手段으로 回轉界磁極을 高性能 永久磁石으로 代置하여 Brushless 化하였다. 그러나 容量의 增加와 回轉子의 高速化는 Bearing 部와 出力電壓의 周波數制限을 받음과 同時에 負荷의 程度와 回轉速度에 따르는 端子電壓의 固有變動이 問題視된다.

또한 電壓調整에 있어서는 電機子卷線側에 飽和卷線을 設置하거나 調整回路에 N.F.B. 方式 혹은 機械的인 人力部에 Slip 傳動裝置가 考案되어야 할 것이다. 이 외에도 P.M.G. 는 界磁極의 磁氣的 損失과 弱화로 因한 使用上 永久的인 機械로서보다 Constant Speed Constant Load 에서 電壓調整이 不必要한 境遇, 例로써 Missile, 혹은 航空機用의 主發電機와 大容量 Brushless 發電機의 Pilot exciter 로서 殘留磁氣의 消失防止와 Response 를 考慮하여 使用하게 된다. 그림 1은 missile 用 小型超高速 P.M.G.²⁾로써 0.9p.f에서 600VA, 24,000r.p.m에서 3φ 200V, 400%, 重量은 1.7kg 이다.

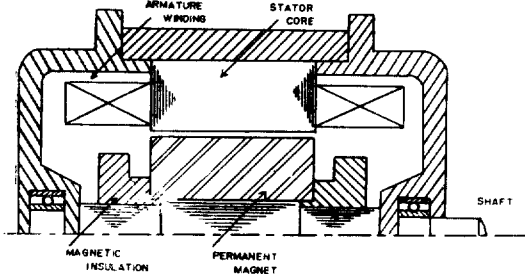


그림 1. P.M.G.

3. 2. 交 流勵磁回轉整流器型 Brushless 發電機³⁾

當初 Miller 氏에 依하여 提案되었으며 容量의 大小에 拘碍없이 一般化되고, 널리 알려진 型式이다. 其 基本回路를 그림 2에 表示한 바와 같이 構造的으로 回轉電機子型과 回轉界磁型을 併合하여 Brushless 化하였다. 即 一般 同期機의 整流器와 Slipring 을 回轉整流器로 代置하였으며 界磁極은 突極型이나 圓筒型에 關係없으나 突極特性이 優勢하다. 一便 固定子側에는 回轉하는 P.M 磁界로 因하여 Pilot exciter 의 電機子卷線에 誘起되는 交流磁電力과 主發電機의 端子에서 檢出되는 電壓을 N.F.B. 制御에 依하여 整流 乃至 電壓調整을 하여 靜止勵磁卷線에 供給하게 된다. 이 方式은 發電機의 容量의 大小, 運轉速度의 高低, 負荷力率, 혹은 負荷種別에 따라 數 많은 改良과 負荷電流의 要求에 따라서는 出力을 Stationary Rectifier 로 全波整流하여 이를 直流發電

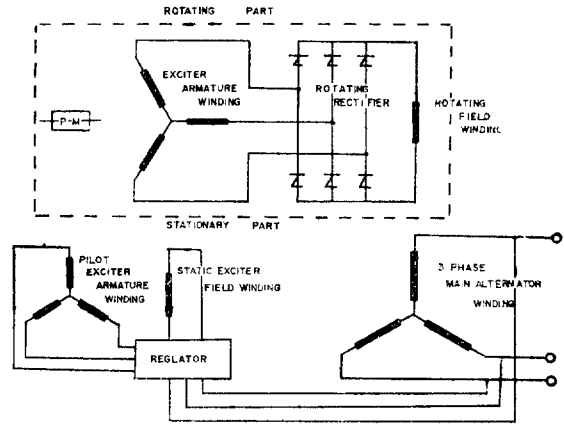


그림 2. 交流勵磁回轉整流器型 Brushless 發電機의 基本回路圖

機로 한다. ACexciter 의 定格出力, 電壓, p.f가 決定되면 exciter 의 電機子卷線은 單相 혹은 多相方式이 採用되나 Harmonics 를 考慮하여 5相 혹은 6相方式이 一般的이다. 整流方式에 있어서는 그림 7의 (b) 및 (c)와 같이 半波 혹은 全波整流하게되나 回轉整流器의 機械的인 強度보다는 Cooling 에 困難을 느낀다. 또한 多段勵磁系統을 經由하므로 發電機의 絡特性和 Response 를 參하여 勵磁機의 極數를 크게 選定하고 周波數는 高速機에서 200~400%, 低速機에서 商用周波數 程度로 開路時定數 Tdo'를 考慮하여 設計하게 된다. 亦是 S.R의 開發에 따라 急速히 實用化되었으며 近來에는 小容量級으로부터 事業用 大容量級에 이르기까지 西歐 maker 의 注文統計로 보아 75~80%를 占하고 있는 型式이다.

3. 3. Induction 發電機,

他勵型으로써 構造簡單하며 堅固함이 特徵이다. 勿論 Slide Contact 가 省略되며 構造는 그림 3의 (a)와 같고 (b)는 其結線을 意味한다.

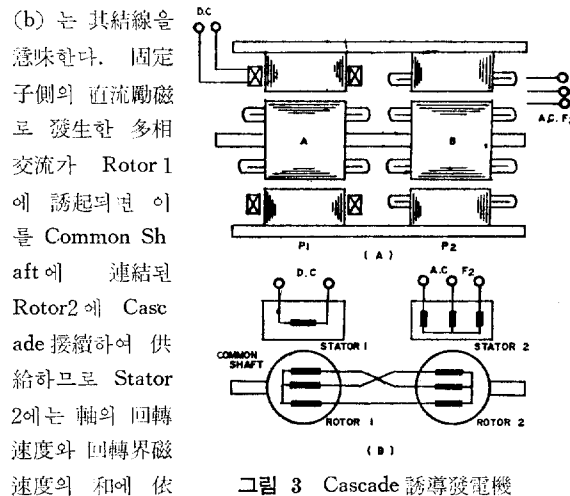


그림 3 Cascade 誘導發電機

한 周波數인 交流을 誘起케 한다. 回轉速度를 η 라하면 發生周波數關係는 $f_1 = p_1 n / 120$, $f_2 = n(p_1 + p_2) / 120$ 로써 比較의 低速度에서 高周波 發生이 容易하므로 Cascade Inverter, 혹은 Induction Generator 로 불리운다. 여기에서 同期速度를 n_s 라하면 Ideal Generator 의 效率 $\eta = n_s / n$ 이므로 η 增加에 η 가 低下하는 缺點이 있다.

여기에서 發生하는 Power Loss 는 大部分 熱로서 放散되므로 이 方式은 main generator 로서 보다 定負荷 短時間 定格인 Robust Generator 로서 適合할 것이다.

3.4. Inductor 型發電機⁴⁾

誘導子型發電機는 勵磁卷線과 負荷卷線이 固定되어 있고 誘導子型 磁極이 回轉하므로써 Brushless 化된 一種의 同期發電機이다. 이를 區分하면

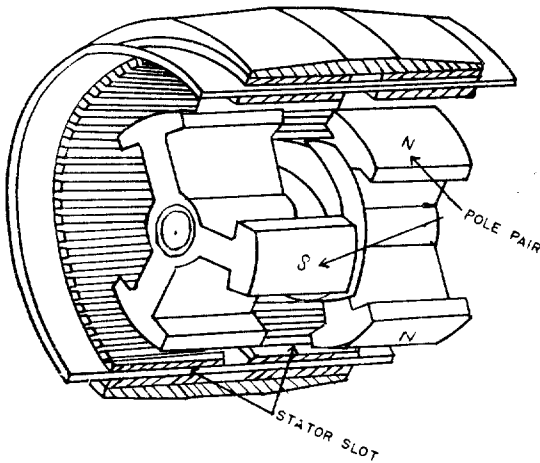


그림 4. Homopolar Inductor 型發電機

Inductor 型發電機 { 變磁束型
 定磁束型*
* { 雙極型(Heteropolar)
 單極型(Homopolar)*
* { 單誘導子型
 複誘導子型으로 區分되나 어느 型式이나 界磁束이 誘導作用에 依하여 負荷卷線에 鎖交되는 Reluctance 를 變化시킴으로써 負荷卷線에 E.M.F. 가 誘起된다.
그림 4에 Homopolar 型의 一例를 表示한 바와 같이 回轉하는 Inductor 의 Pole 數 選定이 自由로운것이 特徵이다.

例로서 航空機 積載用電動機는 小型輕量化한 手段으로 高速電動機가 要求된다. 여기에 誘導電動機를 採用할 抗遇, 電源供給用發電機로서 f 는 800~2,000% 範圍에서 혹은 V.S.C.F.⁵⁾(Variable Speed Constant Frequency) 電源供給用 電力發電機로서 用途가 있다. 또한 Magnetic Amplifier., Radar., Carrier 等の 數W級 高周波發電機와 自動交換機의 多周波可聽周波數를 넣기 爲

한 Signal 로서도 適合하다.

一般的으로 Homopolar 型의 開發이 優位에 있음은 Heteropolar 型에 比하여

- (i) 固定子の 全 Slot 가 出力卷線으로 利用된다.
- (ii) 勵磁는 1個의 Coaxial Coil 即小電力으로 可能하다.
- (iii) 多相方式에서 相間의 平衡이 簡便하다.
- (iv) 보다 輕量化된다.

等の 利點이 있기 때문이다.

이 方式은 全般的으로 高周波로 因한 鐵損 또는 勵磁損增加로 效率低下와 卷線方式에 있어서도 全節段卷이므로 電壓變動率과 高調波로 因한 別力電壓波型이 Trapezoidal 波等の 問題가 있으나 이를 全波整流하여 直流發電機로 한다면 驅動機關의 速度變動으로 因한 諸問題가 無視될 것이다.

3.5 Solid Rotor發電機²⁾

Rotor 側에서 界磁卷線을 機械的으로 分離시켜 回轉 界磁極에 磁氣的으로 勵磁 Energy 를 傳達하는 型式이다. 其 磁氣回路構成의 一例를 그림 5에 表示한 바와 같이, 固定子側에 負荷卷線이, 그리고 Yoke 의 兩端 magnetic end bracket 에 界磁卷線을 支持하고 Solid rotor

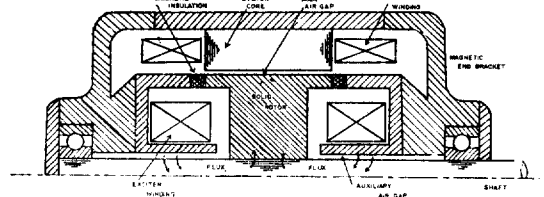


그림 5. Solid rotor發電機의 斷面圖

의 磁極面과 磁氣的으로 絕緣되어 있다. Field 에 供給되는 電力은 DC 이며 其 界磁束은 Auxiliary air gap 와 shaft 를 通하여 Solid rotor 에 磁氣的으로 供給된다. 이 磁束은 다시 電機子鐵心과 맞서는 Main air gap 를 通하여 電機子卷線과 鎖交하여 端子에 交流電力을 誘起시키는 一種의 Brushless 同期機이다. 萬若 Auxiliary air gap 를 없게하는 Brushless 勵磁方式이라면 3.2에서 說明한바와 같이 昇磁卷線이 機械的으로 固定子側에 位置하고 回轉整流器가 必要하게 될 것이다. 이 方式의 모一是 磁氣回路는 交流勵磁回轉整流器型에 比하여 길게되며 2個로 分離된 磁氣回路는 Reluctance 增加와 shaft 徑의 增加로 發電機의 全重量이 一般 同期發電機보다 約15% 程度增加되는 結果가 있으나 超高速機로써 回轉子側卷線과 整流器로 因한 溫度上昇制限을 받지 않으므로 空冷式에서 250°C 인 以上 높은 溫度에서 運轉할 수 있는 有利한 條件으로 다음 몇가지 方式을 說明한다.

3.5.1 Lundell 型發電機⁶⁾

發電機의 圓筒型 Yoke 에는 電機子鐵心과 卷線이, 그리고 其 兩端部에 Stationary field coil 이 固定되어 있

다. Rotor에는 2개의 磁極群 即 기다란 Solid 狀磁極이 交互로 N.S. 極을 이루고 있으며 極性分離上軸과 回轉子 間을 磁氣의 으로 絕緣되어 있다. 또한 Lundell 型은 一般 突極機에 比하여 極히 微少한 界磁電力이 所要되는 反面 渦流에 依한 Bearing 損傷을 防止하기 爲하여 Stator core 兩端의 周圍에 非磁性體 Ring 을 挿入하여 構造上 Solid rotor 의 設計와 漏洩磁束 防止等은 二重 空隙으로 因하여 困難을 느낀다.

Lundell 型은 發電機로서보다 電動機로서 有利한 特徵을 갖고 있으며, 例로서 S.C.R. 靜止轉流器와 回轉子位置檢出裝置等을 併用하여 高壓直流 Propulsion Motor 로서 短時間定格可變速度用에 適合하다.

3.5.2 SECSYN 發電機²⁾

Stationary exciter coil synchronous 의 준말로 Bekey, Robinson 氏에 依하여 考案되었다. Stator 에 負荷卷線과 2개의 field coil 을 갖고 있을뿐 比較的 簡單하나 回轉子는 工作上 極히 困難한 型式이다. 外部特性和 用途面에서 Lundell Type 와 비슷하다 界磁卷線의 平均길이는 1/2程度이나 實際 2개의 界磁卷線이므로 全界磁電力은 大略 같게 所要된다. 또한 magnetic circuit 는 보다 짧으므로 磁性材料는 節減되나 總合的인 重量과 Size, 그리고 効率에는 別差가 없다. 設計의 見地에 SECSYN 型의 보다 安全한 回轉子設計는 4極以下로서 最大 回轉數는 12,000r.p.m. 에서 400% 로 當初 航空機의 主發電機로서 研究目的이 있던 型式이다.

3.6 부러쉬리스 自動型 單相同期發電機⁷⁾와 發電領域을 가진 Brushless 充電發電機⁸⁾.

野中氏와 筆者의 考案으로 比較的 小容量, 單相 또는 直流出力을 目的으로 其 基本回路는 그림 6과 같다. 固定子 Slot 에 큰면서 勵磁卷線과 負荷電機子卷線이 90°의 相差角을 이룬 不平衡 2相卷線으로 挿入되어 있고 큰면서 勵磁卷線端에는 進相用 콘덴서가 接續되어 있다. 同轉子는 突極型 혹은 圓筒型에 單軸 혹은 雙軸으로 回轉界磁卷線을 감고其 兩端을 回轉整流器로 短絡되어 있다. 發電機의 回轉速度 ω 는 正逆回轉을 意味하며 ω 가 增加함에 따라 Condenser 勵磁卷線에는 微少한 殘留電壓이 誘

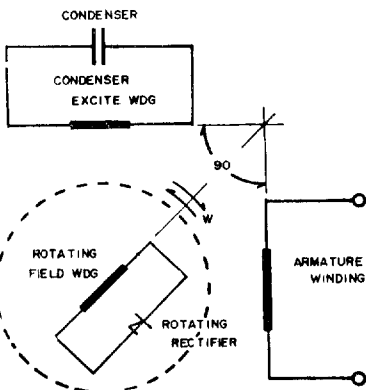


그림 6 부러쉬리스 自動型 單相 同期 發電機

에 따라 Condenser 勵磁卷線에는 微少한 殘留電壓이 誘

起되고 이로 因한 進相電流가 循環하게 된다. 또한 이 進相電流는 增磁作用을 일으켜 回轉子를 勵磁하므로 回轉界磁差線에는 速度起電力이 誘起된다. 이를 回轉整流器가 自己 半波整流 함으로서 界磁極은 電磁化된다. 이와같이 原因과 結果가 相對的으로 增加하여 어느 規定值의 ω 에 있어서 鐵心으로 因한 跳躍現象 (Step jump) 에 依하여 急激히 各回路에 電壓이 確立되어 自動發電이 始作된다. 다시 ω 가 漸次 增加함에 따라 Condenser 勵磁卷線의 回路定數는 鐵共振點에서 容量性 Impedance 가 誘導性으로 變換하여 減磁作用으로 因한 發電이 停止한다. 이와같이 本方式은 廣範한 運轉速度에서 發電不能領域, 發電領域, 그리고 發電停止領域이 順序的으로 發生함을 特徵으로 하며 이 出力을 全波整流함으로써 電壓調整器의 省略과 負荷電流를 自己制限하는 特殊한 充電發電機로서 쓰인다.

4. Brushless 勵磁方式의 問題點

4.1 回轉勵磁機의 電機子卷線과 整流方式

勵磁機의 電機子卷線은 主發電機에 對한 勵磁容量에 따라 單相 혹은 多相卷線으로 區分하고 回轉速度에 따라서 突極 또는 圓筒型으로 設計된다. 그림 7의 (a)는 3.6 方式의 回轉界磁卷線에 (b) (c)는 3.2에서 主發電機에 對한 出力, 電壓, 電流, 力率等이 주어지므로서 卷線의 相數, 結線法 그리고 整流方式을 例示하였다. 여기에 共通된 問題點으로서는 誘起된 起電力이 整流課程을 거쳐 誘導負荷인 界磁卷線에 供給되는 點이다. 또한 固定子側에서 AC 혹은 DC 로 勵磁되는 點과 電機子 反作用으로 因한 Harmonics 와 起電力波型의 distortion 等을 考慮하여 5相 혹은 其以上을 擇하는 境遇도 있다.

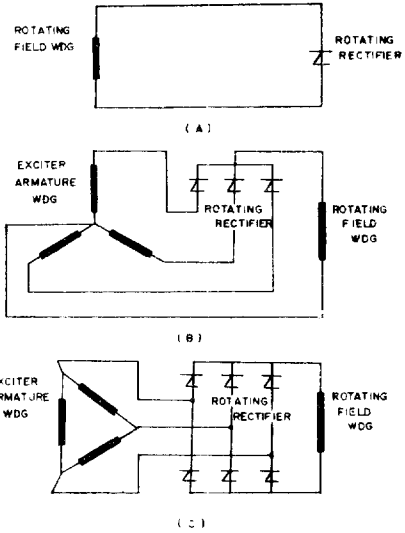


그림 7 回轉整流器型勵磁機의 電機子卷線과 整流方式

周波數는 500% 程度의 높은 값이 Response 에 有利하나 過하면 渦流損과 Reactance 增加로 制限을 받는다 整流方式에 있어서는 整流素子의 順方向電壓降下分에 對한 補償, 運轉中 異常 P.I.V. 또는 整流器의 利用率

과 保護方式等을 考慮하여 設計되어야 할 것이다.

4.2 回轉整流素子の 物理的特質

回轉整流器는 Brushless 勵磁方式의 心臟部로써 特別 運轉中 保守가 不可能한 點에서 充分한 餘裕와 信賴性이 必要하며 小型輕量化와 高効率等の 電氣的 耐性外에 充分한 機械的強度가 要求된다. 最近 發電機의 高速化로 因한 遠心力과 衝擊. 그리고 使用溫度의 上昇等으로 內的으로는 P.N. 接合部의 影響과 外的으로는 Case 에 對한 變形과 漏洩이 問題이다. 故로 回轉整流器는 Shaft 中心가까이 또한 遠心力에 對한 SR 의 位置를 考慮하여 設置한다. 即 超高速機에 있어서는 Shaft 의 內部에 혹은 外部에 부쳐 冷却效果를 높이는 方法이 考案되고 있다. 最近 S.R. 의 製造方法에 있어서도 接合部의 擴散法, 特殊熔接法, Ceramic 의 固着法, 特殊 Gas 封入等으로 質의 向上되었으며 強度에 있어서도 Case 에 加해지는 靜壓力 3,000kg 와 接合部에 200kg 3,000Hrs 에 서 順方向 및 逆方向特性에 變化가 없는 試驗實績³⁾으로 고아 物理的 強度에는 問題視되지 않는 傾向에 있다

4.3 回轉整流器에 要求되는 電氣的條件

Rotary Rectifier 의 安全條件은 公稱順方向電流, P.I. V. 그리고 Surge 逆耐壓이 主要한 要件이며 電力機器로서 豫想되는 모든 運轉條件에서 安全과 信賴性이 이를 評價한다. 即 定常狀態에 있어서는 正方向電壓降下로써 이 는 電流와 溫度의 exponential 이므로 電壓變動에 關係하고, 過渡狀態에 있어서는 發電機의 逆相分이 界磁 電流에 加重할 境遇와 同期脫出時로써, 前者는 逆相分이 直流分보다 큰 境遇에 發生하는 異常電壓이며 後者는 瞬間的인 誘導發電機作用으로 因하여 Slip frequency 의 交流分이 重疊하여 發生하는 異常電壓이 負性으로 S.R. 端子에 作用하게 된다.

4.4 回轉整流器의 溫度上昇과 冷却.

回轉整流器의 溫度上昇은 負荷電流에 依한 順方向電壓 降下와 逆方向에 흐르는 漏洩電流의 Function 으로 더욱 增高, 回轉하며 振動하는 機械的 惡條件과 發電機의 鐵과 銅部分에서 發生하는 熱源, 그리고 直結된 驅動機關

의 放熱等이 加重되는 可酷한 位置에서 安全하게 動作 하여야 한다. 特別 航空機 또는 宇宙空間을 飛行하는 機械는 -40~180°C 인의 廣範한 溫度差와 地上과 高空에 서 急變하는 冷却效果의 差로 特殊氣冷 또는 oil cooling 方式이 採用된다. 最高 許容溫度는 發電機의 構成材料 에도 影響을 받게되며 Gallium, Arsenide, 또는 Silicon Carbide 등의 半導體開發로써 許容溫度를 더욱 높일수 있을 것이다.

5. 結 論

以上 發電機를 中心으로 Brushless 勵磁 方式을 種類 別로 其 原理와 用途 그리고 構成概要를 略說하였다. Brushless 勵磁方式의 展望과 關聯的條件 等に 不備한 點이 많으나 이 分野에 研究目的을 두는 分, 혹은 國產化를 計劃하시는 分께 조금이라도 도움되었으면 한다.

參 考 文 獻

- (1) 三菱 事業用大容量發電機의 부러쉬리스 勵磁方式 三菱技報 Vol. 40 1966.
- (2) Ford, Brushless Generator for A/C, A Review of current development. I.E.E. Jan 1962.
- (3) Henkels, Silicon Rectifier in Brushless Machinery. A.I.E.E. Comm & elect Nov 1957.
- (4) Walker, The Theory of the Inductor Alternator. I.E.E. Nov 1941.
- (5) Hoard, Constant frequency Variable speed frequency make up Generator. A.I.E.E. App & Ind Nov 1959.
- (6) Janois. High Voltage D.C Brushless torpedo Propulsion Motor. I.E.E.E. Trans Ind. Vol 1GA-2 Aug.1966.
- (7) 野中, 부러쉬리스 自動型單相同期發電機. 日本電氣學會 1962年 4月
- (8) 野中吳, 自動型부러쉬리스充電發電機의 發電領域에 對하여 日本電氣學會(連大) 1967年 4月.