

低落差 大容量 水力發電所에 Bulb型 水車發電機 使用의 檢討 (II)

南 廷 一*

4. 1·2 速度調整 問題

Bulb 型機 設置發電所가 自己容量보다 훨씬 큰 系統에 連結될 境遇 bulb型機 速度調整問題는 그리 憂慮되는 바는 아니다. 同期結合을 順調로이 實現 시키기 爲해서는 發電機의 無負荷 回轉이 매우 規則的이어야 되는데 運轉 經驗에 依하면 同機의 無負荷 回轉은 極히 安定狀態를 보여 주었으며 流入水의 狀態에도 아무런 亂調現象을 보여 주지 않았다. 하기는 嚴格한 同期結合問題는 반드시 不可避한 것은 아니며 大部分의 境遇 自動同期化에 依한 結合方法을 擇하려하나 精密한 速度調整이 주는 利得은 別로 없는 것이다.

Bulb 型 同期機가 系統에 結合되면 곧 充分한 安定度 限界를 가진 火力機나 在來型 水力機에 依하여 本質的으로 낮은 同機의 安定度는 全系統과 더불어 保障 維持되게 된다. 그러던 問題는 分離된 系統에서의 bulb型機의 運轉일 것이다. 卽 앞서 말한 大容量 系統에서 事故가 發生하였을 境遇라던가 大系統과 連繫되어 있지 않은 地域의 新規火力發電所가 局部地域의 負荷에 隸屬되게 되는 境遇等に 問題가 될 것이다.

依落差水力發電所의 速度調整問題는 많은 研究對象을 갖고 있다. 이에 關聯되는 問題는 水壓變動에 따르는 水槌作用現象(water hammering)이며 이의 時間特性

$$\theta = \frac{\Sigma LV}{gH} \text{ (sec)}$$

L : 水壓管의 길이
 V : 流速
 H : 落差

의 值가 比較的 크다. 勿論 速度調整問題를 爲하여 單位慣性定數 $T = \frac{I\omega^2}{P_n} \text{ (sec)}$ (I : 慣性 moment, P_n : 規定出力)가 水槌作用의 時間特性 θ 보다 큰 發電機를 使用하면 되나, 費用이 高價로 될 것이므로 改良된 調速機를 利用해서 解決코자 하고 있다.

萬一 bulb 型機를 使用할 境遇 水槌作用 時間特性은 一般的으로 發電機의 單位慣性定數보다 크게 될 것이므로 問題가 妙하게 된다. 本來부터 在來型機에 對해서는 速度調整의 安定度を 研究함에 있어, 水車에 依해 發生되는 出力은 落差의 自乘根에 따라 變하며 速度에는 無關하다고 假定하고 있다. 그러나 萬一 bulb 型機의 境

遇에 이 假定을 適用한다면 速度調速의 安定度는 매우 感度가 低한 調速機로서만이 理論的으로 얻어질 수 있으며 이로 얻어진 調整效果는 極히 不良하게 될 것이다. 그래서 在來型機에 對한 이러한 假定이 調整安定度面에 適合치 못했기때문에 Eulb型機의 模型을 水理特性面에서 다시 檢討하게 되었다.

이를 詳細히 檢討하기 爲해서는 水口의 開度와 回轉速度에 따라 機械的 出力의 變化를 表示하는 bloc diagram 이 必要하게 될 것이다.

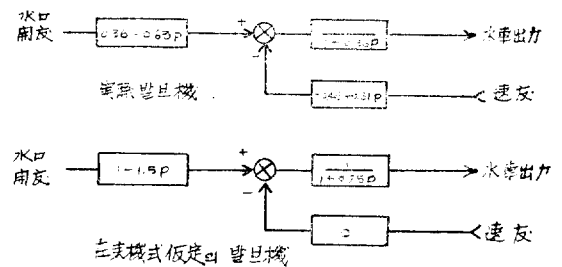


그림 8. Bulb 型機의 bloc diagram

그림 8 에는 實際 bulb 型機와 在來型機의 假定을 適用한 bulb 型機의 두 境遇에 對해 水槌作用時間特性이 1.5秒인 特殊境遇에 지나야 할 各部分의 數値가 表示되어 있다. 이 bloc diagram 의 檢討로부터 나타난 最初의 事實은 實際 bulb 型機의 境遇 速度變化가 機械的 出力에 對해 顯著히 影響되고 있는 點이다.

이 現象은 瞬時 自動調整方式으로 改良시킬 수 있다. 回轉速度에 對한 이러한 影響力의 發生과 이로 因해 水車出力에 미치는 現象外에 同圖에서 機械的出力의 傳達函數值가 平衡狀態에서 實際 bulb 型水車의 境遇 顯著히 적음을 알 수 있다.

따라서 特히 積分型 要素의 動作常數가 orifice 型 水車에 對한 簡單한 假定으로 얻을 수 있는 值보다 높게 될 調速機를 使用하기에 이른다.

그러나 servomotor 動作 速度를 增加시킨다 해서 調整速度를 顯著히 改良할 수는 없다. 왜냐하면 機械的 出力面에 미치는 水口機關의 一定變化의 影響은 豫想했던 것보다 훨씬 弱하며 積分型 要素에서 動作常數의 增加에 依해 可能했던 結果와는 實際 逆比例되고 있다.

* 韓國電力 企劃部 電源開發課 · 正會員

調整의 安定化는 萬 · 水車의 細密한 特性을 參酌하면 在來型水車에서 한 假定을 bulb型水車에 한 것보다 더욱 容易할 것으로 期待된다. 이는 例를들어 在來型調速機가 附屬되었다고 假定하고, 分離된 系統에 供給하는 bulb型機가 維持하여야 할 電力의 單位階段狀 入力에 對한 indicial response(指數係數의 應答)의 檢討로서 確認되고 있다.

單位慣性定數를 1秒, 水槌現象 時間特性을 1.5秒로 假定한 위의 施設에 對해 두 境遇 모두 調速機特性은 實際 bulb型의 境遇도 orifice水車에서 假定을 한 bulb型의 境遇와 같은 最大過速度를 갖게끔 選擇하여 다음과 같은 動作數值를 얻었다.

積分型 要素에 依한 動作常數;

$$\frac{1}{\tau} = 1.25(\text{實際型}), 0.65(\text{orifice型})$$

誘導型要素에 依한 動作常數;

$$m = 2s(\text{實際型}), 1.34s(\text{orifice型})$$

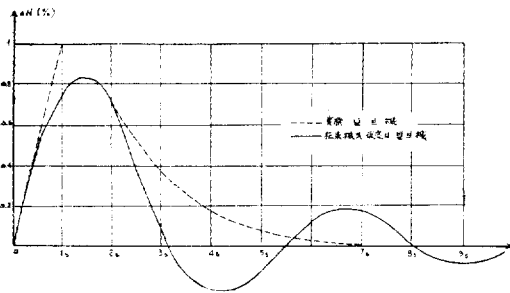


그림 9. 負荷 1%의 單位階段狀 入力에 對한 速度의 指數係數의 應答

이의 indicial response 曲線은 그림 9에 表示되어 있다. 實際 bulb型機의 過渡狀態는 orifice型機의 境遇보다 훨씬 緩和되어 있으며 이 事實로서 bulb型機의 調整限界의 安定化 問題는 水車의 本來 特性에 依해 容易하게 이루어짐을 確認할 수 있다.

水車의 正確한 特性을 考慮함이 調整問題檢討時 매우 重要한 것이며 尙今도 在來型機에 適用될 수 있는 orifice型機에 對한 假定은 여기서는 매우 不適合한 것으로 利用할 수 없게끔 되었다.

同指數係數의 應答曲線은 實際 bulb型水車의 特性을 參酌해도 調整效果는 그리 크지 않다는 事實과 이는 다만 留意해야 할 周波數位相角의 初期偏差를 보여 주고 있다. 이는 勿論 작은 單位慣性定數에 起因되고 있으나 約 0.8배에 該當되는 어떤 速度의 最大位相角值를 갖게 되면 이를 誘發한 負荷位相角은 不安定視되게 된다. 이에 對해서는 後에 生覺해 보기로 하고 먼저 調整性能의 改善可能性을 檢討하기로 한다. 이는 勿論 在來型機에 實際로 利用되고 있는 調速機型式보다 훨씬

細密히 研究된 型式의 調速機를 利用해야만 實現이 可能할 것이다. 이와 關聯하여 水口機關의 迅速한 變化를 시켜주기 爲해서는 두가지 問題가 부각된다. 첫째는 速度 上昇 時에 調整限界를 安定化시키는 것이다.

調整限界內에서 最小值以上の 相差角을 誘發하는 機械的 反作用을 參酌하면 調整 安定化는 다만 調整要素特性에 或種의 修正을 해서 一定한 危險을 무릅쓰므로서만 이루어질 수 있다. 달리 말하면 調速機內에 利用되고 있는 增幅裝置의 gain이 銳敏하게 減少함에 따라 消滅될 條件附의 安定度만을 이룰 수 있다. 그러나 이것은 調速機 性能 改善에 重大한 障礙가 되지 않는다고 生覺되며 技術上으로 이 種類의 機械材料를 充分히 解決하고 있다.

둘째 問題로는 水車水口 및 이의 操作機構의 規格이다.

이는 水力 反作用과 이로 因해 機械에 미칠 危險性을 考慮하면 操作最大速度의 增加는 크게 期待할 수는 없을 것아다.

그러나 線型變化의 操作區間內에서 動作最大速度를 變化시키지 않고 動作의 速度를 增加시킬 수 있을 것이다. 操作의 效果는 다만 比較的 輕負荷變動에 대해서만 實際 突發의인 放水에 影響없이 一定하게 維持될 것이다.

特別한 境遇를 除하고는 例를 들어 얼마늬 製造工場에 電力을 供給할 境遇 系統負荷의 變化는 同工場負荷가 어떤 電力值에 到達되면 充分히 弱한 值로 維持된다.

우리는 性能을 改善한 調速機를 利用해서 規定周波數의 維持에 顯著한 改善을 期할 수 있다. 이 問題는 實際 研究途上에 있다.

現在까지 主로 bulb型機에 依해 供給되는 線路의 指數係數의 應答에 對해 檢討했다. 그러나 우리가 궁금해하는 問題의 窮極은 bulb型機에 依하는 在來型機에 依하여 供給되고 있는 한 系統의 周波數調整效果를 客觀的으로 比較하는 것이며 이를 爲해서는 例의 系統의 負荷變動特性을 나타내는 統計值를 參酌할 必要가 있게 될 것이다.

한 系統의 代表的 負荷變動範圍는 式 $E = \sqrt{mP}$ (MW) 或은 $\sqrt{\frac{m}{P}}$ (對單位容量)로 表現되고 있다. 系統이 줄어들수록 負荷變動의 值 $(\sqrt{\frac{m}{P}})$ 는 적어진다. 여기서 係數 m는 系統의 工業化 傾向을 대충 表示하고 있다. 50MW 系統의 境遇를 例로 들어 生覺해 보자.

m의 值를 比較的 높은 0.03으로 取하였을 때 負荷變動의 代表的 變化範圍는 約 1.2MW로써 大略 系統 電力의 2.4%에 該當되는 것이다. 負荷變動의 스펙트럼

(spectre)分布를 細密히 檢討하기 위하여 이를 $\frac{k}{v^2+a^2}$ 의 形式으로 表示해 보자. 그리하여 單位慣性定數가 7秒인 在來型機에 依하는가, 同定數가 1秒인 bulb 型機에 依하여 供給되는 系統을 生覺해보기로 하자. 두 境遇 모두 水槳現象의 時間特性은 1.5秒이다.

調速機型은 加速回轉計式이고, 定數는 두 境遇 거의 同一한 安定度限界를 얻을 수 있도록 選擇되었다 하고, 速度는 調速機가 지나고 있는 形態를 考慮하여 可能한 限 크다고 하자.

여기서 얻어지는 周波數變化 負荷變化의 '閉 loop' 制御系에서의 傳達函數는 그림 10에 表示 되어 있다. 여기서 우리는 bulb 型機의 單位慣性定數의 微少한 値에 따르는 變

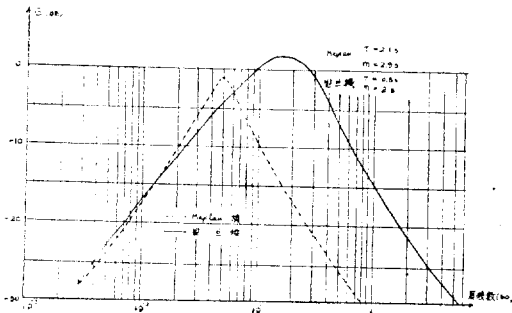


그림 10. Kaplan機와 bulb機의 閉 loop 系 傳達函數

形狀態를 確認할 수 있다. 이 傳達函數의 遲滯으로 負荷變化의 스펙트르를 參酌해서 周波數變化의 스펙트르 分布를 計算할 수 있다.

以上 例記한 系統에 對하여 同計算이 施行된 바 있으며 그 結果는 그림 11에 表示되고 있다.

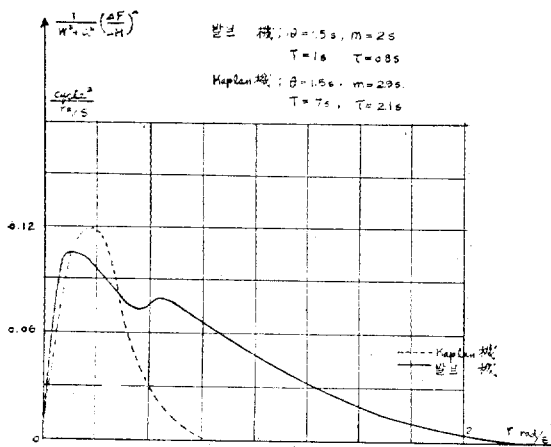


그림 11. 周波數 變化의 스펙트르 分布 曲線

周波數變化의 相差角 形狀은 스펙트르 分布曲線과 座標軸으로 이루어지는 面積의 函數이며 例의 두 境遇 bulb 型에 對해 0.31HZ, kaplan 型에 對해 0.21 HZ이다. Bulb 型에 對한 增加分은 우리가 믿었던 바 만큼 크지 못한 것이다.

이는 負荷變動의 比重이 周波數와 함께 減少하며 機械의 慣性 moment의 減少 結果는 例를 들어 指數係數의 應答의 檢討時와 마찬가지로 될 關係되는데 基因하고 있다. 萬一 負荷의 相當한 變化는 Gauss의 一般法則을 쫓는다는 事實을 想像하면 周波數相差角이 어떤 値보다 크게 되는 동안의 時間 %를 計算할 수 있을 것이다. 이의 結果가 表 1에 表示되어 있다.

表 1. 周波數相差角이 Δf 보다 큰 동안의 時間 100分率(%)

Δf	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
在來型 kaplan(%)	64	33	16.5	6	1.5	ε	--	--	--
Bulb 型 機(%)	73	53	34	20	12	6	2.5	1	ε

以上の 數值들은 特別한 重要性은 없지만 周波數 維持效果가 規定 需要家 電力供給에 잘 調和되면서 分離된 系統에서 bulb 型機가 設置된 發電所의 運轉이 可能함을 示唆하고 있다.

그런데 在來型機에 具備되어 實際 이에 잘 適應하고 있는 調速機보다 더욱 改良된 것을 利用함으로써 同 bulb 型機의 調整效果는 顯著히 改善할 수 있다고 본다. 結局 이렇게 해서 얻어진 效果가 實際 運轉에 있어 滿足感을 주지 않는다면 우리는 bulb 型機를 큰 速度(1,500 rpm)로 回轉하는 同期電動機(fly wheel 附)에 協助시켜 例의 系統의 固有慣性 moment를 增加시킴을 豫想할 수 있다. 이 同期電動機는 또한 無効電力 發生 可能性의 利點도 가질 수 있다.

弱한 reactance 値의 發電機와 電動機의 結合으로 서만 慣性 moment 發生 費用이 發電機 回轉子에 붙게 된다 하여도 이 慣性 moment는 10倍나 큰 速度에서 發生되기 때문에 總括적으로는 實際 적은 費用으로 다룰 수 있게 된다.

4. 1.3 動態安定度(Dynamic stability)

動態安定度面에서 bulb 型機 使用으로 派生될 特殊 問題點은 亦是 同型機의 單位慣性定數의 値가 매우 적은 데 關係되고 있다.

系統上에서 負荷減少라던가 어떤 原因에 依하여 結果의으로 이리나는 機械의 加速는 單位慣性定數 및 發電機 回轉子와 系統電壓과의 相差角에 逆比例되고 있다. 따라서 同期脫調가 發生하기 前 事故除去를 爲한 時間 制限 (tm)은 單位慣性定數 (T)와 關係되게 된다.

同關係는 大略 $tm = kv\sqrt{T}$ 의 形態로 되며 常數 k는 여러 要素의 函數로 決定되고 있다.

三相事故에 對해 k의 一般值은 0.1~0.15사이에 存在하며 같은 內容의 故障除去 制限時間이 同期를 維持시키는 內에서 bulb 型機 使用의 境遇 0.09~0.15秒(在來型機에서는 0.25~0.4 秒內 이다) 內에서 變한다는 事實을 留意해야 한다.

系統保護 技能을 維持키 爲해 規定한 時間과 系統 遮斷時間을 參照하면 bulb型機 設置發電所의 動態安定度는 恒常 多相事故의 境遇 不安定하게 될 것이다. 더욱 흔히 發生되는 單相事故에 關해서 佛蘭西內의 自流式 大容量水力發電所에 對한 代表的 系統連結狀態下에서 施行된 安定度 檢討結果는 單位慣性定數值 減少는 安定度面에서 決定的인 影響을 갖지 못함을 보여 주었다.

그러나 單位慣性定數值의 減少와 同期喪失의 危險을 增加시킨다면 이는 反對로 同期化의 自發的인 恢復 可能性을 增加시켜 줄 것이므로 이러한 形態의 運轉方式은 우리에게 많은 興味를 줄 것이다.

또한 自動同期化問題는 다만 發電機의 非同期 運轉에서의 slip가 어떤 制限된 值(即 주어진 電氣의 特性에 對해 bulb型機의 單位慣性定數의 自乘根의 逆에 比例되는) 보다 적어야만 可能함을 알고 있다.

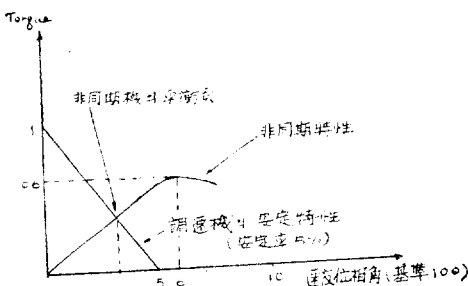


그림 12. 非同期發電機의 技能限界

어떤 系統에서 例의 一個發電所를 從屬시키지 않는 系統事故의 出現으로 同期가 喪失된 後에는 非同期運轉系統은 그림 12에서 보는 바와 같이 非同期 slip torque 特性과 水車 調速機의 安定特性으로 定義되는 어떤 值의 slip로 維持될 수 있다.

이 問題에 對한 檢討結果 매우 적은 值의 單位慣性定數와 水口機關의 最大 操作速度를 參照하면 非同期運轉系統의 持續時間은 充分히 길 수 있고 結果의 으로 保護

機器의 作用을 避하기 爲해서 同期 喪失이 確認되자 곧 發電機 勵磁을 中斷하고 slip의 值가 自動同期化를 迅速하게 이룰 수 있도록 充分히 적은 值로 될 때 비로스 勵磁을 恢復함이 더욱 効果的임을 보여 주었다.

이러한 運轉方式은 勿論 發電機의 slip torque 非同期特性이 어떤 條件에 一致됨이 必要한 것이다. 이 條件을 具備하는 것은 實際 機械 費用의 顯著的 增加없이 實現되고 있다.

4. 2 信賴度 및 保守 問題

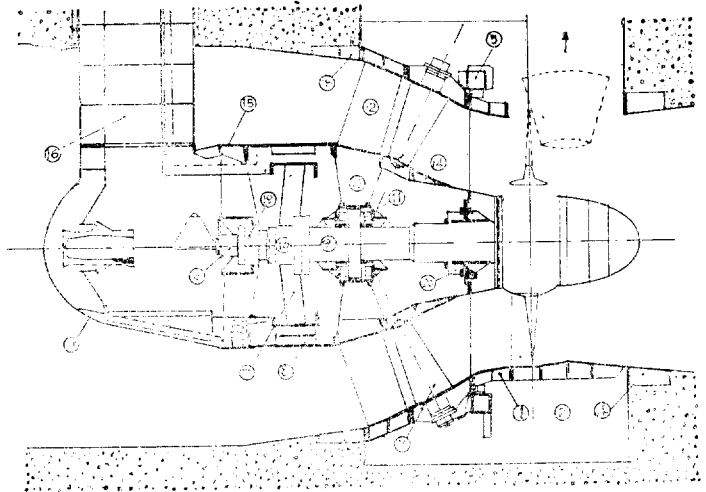


그림 13. 水車날개의 分解

水車外被는 후렌지 조인트된 ①, ②와 亦是 후렌지 조인트로 ③ 및 ④에 固定되어 있는 네個의 링구로 構成되어 있으며 各各의 링구는 十字形의 네部分으로 接合되어 있다. 水車外被의 ① ②의 上半部分을 發電機側으로 分離시켜 놓되 水車날개를 分離시키기 爲하여서는 水門을 閉鎖하고 水管 內部를 排水시켜야 한다. 따라서 起重機에 依하여 水車날개 分離作業을 할 수 있다.

以上的 內容은 電力系統에 關聯된 運轉問題였으며 다음은 發電所 自體의 運轉維持에 對해 檢討하기로 한다.

- ① Bulb 型機와 在來型機 間의 實際 管理監督上의 難易點 比較
- ② Bulb 型機와 在來型機 間의 事故 및 損耗의 頻度 및 拘束度 比較
- ③ 事故 收拾이나 非常 運轉時의 保守作業 所要時間 및 難易點의 比較

等 問題에 對해 例로서 Rance의 境遇와 그의 model case 인 Saint-Malo의 境遇를 들기로 한다.

冷却方式으로 壓縮空氣를 使用하기 때문에 大容量運轉이 어려우나 그리 問題되는 것은 아니다. 오히려 火力 터빈 發電機에 水素가스를 利用하는 點이 더욱 微妙하다 하겠다.

慣例의 으로 點檢하고 觀察하여야 하는 곳은 機械의 回轉部分이나 此外 別個 部分으로써 軸受(bearing), 推力軸受(thrust bearing), 水車軸連結裝置, 各種 펌프,

排水幫浦, 冷却通風裝置等이다.

上記 여러 施設의 故障이라던가 缺點을 遠方에서 檢出해 내기는 特別히 어려운 點은 없으나 亦은 在來型機에서도 흔히 留意하고 있어야 할 機械들이다.

此等한 故障의 憂慮는 各 部分部分을 나누어 生覽할 때 在來型機에서 보는 部分即 水車 runner boss, runner servomotor, 軸受給油裝置等에 比해 別로 새롭거나 다른 點이 있기 때문에 같은 程度로 보고 있다.

一例로서 回轉子 集電環上에서 閃絡 現象이 發生되었다 하여 豫想된 發電機에서 보다 더 걱정되거나 덜 걱정할 바가 아니다.

Bulb 内部에서 行해지는 作業은 機械直徑이 增加할 수록 容易하게 되는 것은 事實이다 Rance의 增進 水管을 遮斷하지 않고 處理할 수 있는 作業內容은 다음과 같다.

- ① 發電機 bearing liner 및 deflector의 交替
- ② 水車 bearing liner 및 deflector의 交替

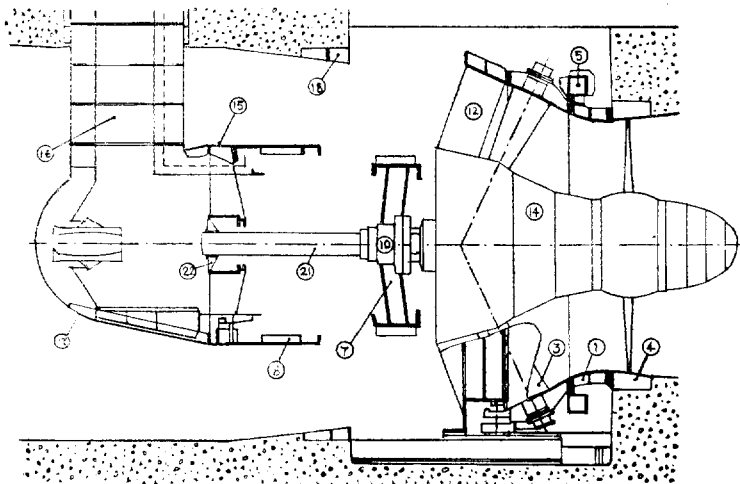


그림 15. 發電機 回轉의 引出

水車回轉部의 分離後 ③, ④ 및 ⑦, ⑧을 分離시킬 수 있다. 그러나 萬一 分解作業이 다른 發電機 固定子나 回轉子에 限할 必要가 있을 때는 水車 回轉部를 分離하지 않고 全體 回轉軸과 더불어 ③ 및 ④을 한꺼번에 運搬臺(底部에 位置)에 於해 後退시킬 수 있다. 이 作業은 補助軸受 ②內를 滑動하는 補助機軸 ②를 發電機軸 ⑩에 連結해서 施行한다.

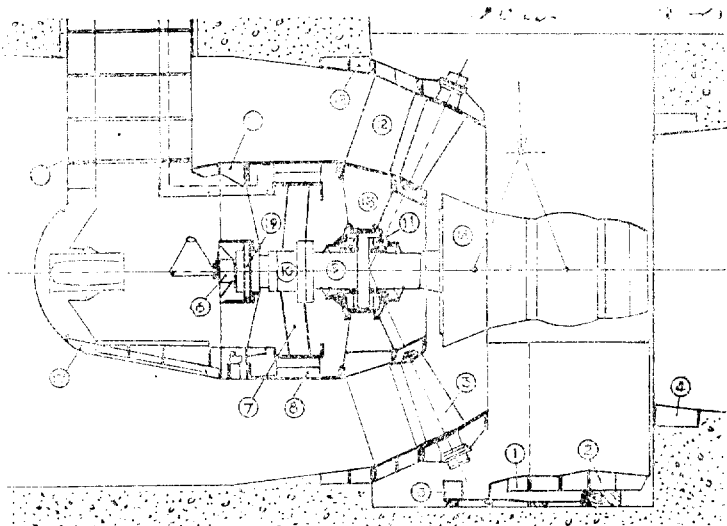


그림 14. 水車 回轉部 分解

(란나브스, 란나써브모타, 水車軸, 水車軸受, 推力軸受를 包含)

우선 案內날개의 썬브모타로부터 水口操作機具(이의 下半部는 底部에 殘在시킨), 水車날개 및 數個의 水車外被에 이르는 分解後에 소켓트 ⑥과 란나써브모타 配油管을 分離시킨다.

發電機 回轉子는 固定子위에 썬기로 받쳐 놓고 水車軸 ⑨와 發電機軸 ⑩을 分離한다. 水車軸에 붙어있는 推力軸受의 支持는 ⑬의 후렌저로부터 分離되어 水車圓筒카바 ⑭도 ③의 內側후렌저로부터 分離시킨다. 따라서 水車 回轉部는 90° 回轉되어 引出될 수 있다.

- ③ 推力軸受의 受金(shoe)과 deflector의 交替
- ④ 水車날개 接續部分의 交替
- ⑤ 回轉子 磁極의 交替
- ⑥ 固定子 母線의 交替
- ⑦ 回轉子 링그의 交替
- ⑧ 其他 補助機器(幫浦, 通風裝置)의 交替

此外 드물게 發生되리라 豫想되는 主要 機械 損傷에 對해서는 作業內容을 豫測하기 어렵겠지만 아마 機體를 分解할 必要性을 느끼게 될 것이며 그림 13 및 15는 가장 重要한 이 分解作業의 基本 課程을 잘 表示해 주고 있다.

이 分解作業은 runner cover를 分離시키는 것으로부터 始作되며 이 部分이 第一次로 處할 수 있는 部分이 되고 있다.

그러면 在來型機에 있어서는 runner에 屬하는 作業內容은 發電機의 境遇보다 훨씬 많은 것이다.

5. 結 論

結果적으로 bulb型發電機에 對해 技術적으로 單位機容量增加의 實現을 봄으로써 例를 들어 使用水量이 300 m³/sec 이고 落差가 10m인 地點에 低落差大容量發電所 施設을 할 境遇 同型機의 設置를 嚴格하게 擧頭시키게 되었다.

이러한 技術變革으로 土木工事 計劃上에서 뿐만 아니라 電氣機械 施設面에서도 顯著的한 投資費의 減少를 可能케 하고 있다.

그런데 電氣機械 施設面에서 볼때 bulb 型機 利用의 發展에 따라 그의 費用節約이 當然히 增加될 것으로 豫想되고 있다.

Bulb 型機에 있어 必然적인 無効電力發生의 難點은 同型機가 在來型機에 비해 綜合적인 費用面에서 不利하게 되고 있으나 이 不利點은 第3節에서 檢討된 結果로 얻어진 同型機의 利得에 比하면 매우 적은 것이다.

또한 速度調整이라던가 動態安定度問題에서 萬一 bulb 型機의 境遇가 在來型機보다 不利하다 할 지라도 이 點 亦是 困難한 問題는 아니며 bulb 型機가 갖는 經

濟的 利點은 結局 利用되어야 할 것이다.

大容量 系統에 bulb 型機를 利用하기 爲해서는 速度調整問題는 絶對적으로 憂慮할 바는 아니며 孤立된 系統에서의 運轉에 있어서도 마찬가지로 調整性能은 大部分의 境遇에 適用할 수 있는 周波數를 維持시켜 주고 있다.

信賴度 問題에 있어서도 同容量의 在來型機의 境遇와 같이 보아야 겠다. 이런 條件下에서 Rance 湖力計劃 (10 MW×24 臺)에 同型機를 使用할 것을 決定한 後 지금 佛蘭西內의 Rhône 및 Rhin 江에 位置하는 두 個所의 發電所에는 單位機容量 20MW를 若干 超過하는 bulb 型機 設置가 計劃되어 進行中에 있다. 그의 重要特性은 다음과 같다.

單位機容量 (MW)	水車直經 (m)	速 度 rpm	落 差 (m)	効 率 (%)
23	5.60	107	11.10	87
20	6.10~6.30	83.3	8.65	87

이들 施設의 竣工은 1965~1966年으로 計劃되고 있다.

(1964年 11月 4日 接受)