

高電圧大容量 回轉 機의 豫防診斷

Prevention Diagnosis of High
Voltage & Large Capacity
Rotating Machine

李 庚 煥

韓國電力 技術研究院 發電研究室長

1. 序 言

産業의 高度成長에 따라 電氣回轉機도 점차 高電
壓大容量化 되어가는 傾向에 있다. 또한 急速한 電
力需要의 伸長에 對處하기 위하여 大容量 火力發電
設備가 建設되었고 또한 大容量 原子力發電 設備도
建設 稼動하게 되며 單位機 容量이 增大하고 高電
壓化되었다. 더구나 Turbine發電機와 같은 高電壓
大容量 回轉機는 廣範圍한 地域에 電力을 供給하고
있기 때문에 信賴性을 확보하는 것은 社會의 安定
과 發展에 대단히 重要하다고 아니할 수 없다. 특
히 原子力發電設備가 차례로 運轉에 들어가 基底負
荷를 擔當하는 體制로 運用됨에 따라 最近에는 既
設 火力發電設備는 負荷調整用으로서 中間負荷, 尖
頭負荷 또는 DSS (Daily Start and Stop) 設備로 運
用되어 運轉狀態가 過酷化되어 經年劣化도 加速化
되는 傾向에 있다. 따라서 高電壓大容量 回轉機의
適切한 保守管理를 實施하여 壽命을 延長하고 事故
를 未然에 防止하기 위해서는 豫防診斷을 技術的으
로 施行하는 것이 가장 重要하다고 生覺되므로 여
기서는 Turbine發電機 豫防診斷을 中心으로 記述한
다.

2. Turbine 發電機의 經年劣化 原因

發電機는 運轉時間에 따라 經年劣化가 不可避하
게 發生하는 것이지만 특히 最近에는 苛酷한 運轉
으로 劣化가 促進되며 그 要因을 要約하면 다음과
같다.

- 가) 起動停止 回數의 增加에 의한 低Cycle疲勞및 摩耗
- 나) 起動停止를 包含한 負荷變動의 增大에 따른 Heat Cycle에 의한 疲勞와 劣化
- 다) 運轉中の 高溫保持時間의 累積에 의한 Creep 와 熱疲勞
- 라) 運轉中の 系統事故, Switching 및 振動等에 의한 疲勞
- 마) 發電機 分解時 周圍空氣中の 濕氣 等에 의한

〈丑-1〉 保守管理項目一覽

名 稱	保守管理項目	主要劣化要因	豫放保全法
Shaft 中心孔	疲勞 (材料의 欠陷, 龜裂의 有無 및 進展)	起動 停止	· 非破壞檢査 · 殘余壽命評價 · 龜裂除去
Shaft Core teeth 部	Fretting 疲勞 (龜裂의 有無)	起動 停止	· 非破壞檢査 · 龜裂除去 · Wedge 交替 및 形狀改善
Shaft Journal 部	疲勞(비틀림) (龜裂의 有無)	事故, 振動	· 非破壞檢査 · 振動監視裝置에 의한 累積壽命消費把握
Rotor Wedge	疲勞 및 Creep (龜裂의 有無)	起動停止 溫度累積	· 非破壞檢査 · 殘余壽命評價 · Wedge 交替 및 形狀改善
End Ring	應力腐蝕	發電機分解時 濕氣	· 非破壞檢査 · 防濕管理 · 龜裂除去 · 殘余壽命評價
Rotor Coil 極間接續銅帶	疲勞 (破損)	起動, 停止	· 目視檢査 · 殘余壽命評價 · 長壽構造로 改造
Rotor Slot 內 Coil	銅帶間 接觸面의 摩耗 및 銅粉發生	Turning (起動停止)	· 摩耗量의 推定 · 分解點檢 · 再發防止對策
Stator Coil	絶緣劣化 固定狀態 絶緣層表面의 狀態	負荷變動 溫度累積 事故, 振動	· 外觀檢査 · 絶緣診斷 · 絶緣更新

影響

이와같은 經年劣化 要因과 運用上의 諸要求에 對應하는 主要한 保守管理項目은 다음 表 1 과 같다.

3. 發電機 回轉子

3.1 Shaft 中心孔

發電機Rotor Shaft 中心孔은 Rotor Shaft 에서도 가장 應力이 높은 곳이다. 더구나 現在와 같이 高度의 製造技術이 확립되지 않은 時期에 製造된 Rotor Shaft 材는 이 中心孔部分의 材料의 欠陷을 가장 含有하기 쉬운 곳이다. 따라서 既設機로서 頻繁

한 起動停止를 하는 設備과 總運轉時間이 10萬時間을 超過한 設備에 대해서는 最新의 非破壞檢査法에 의해 中心孔部分의 欠陷有無를 確認하여 安全性을 確保할 必要가 있다. 中心孔部分에 欠陷이 發見되었을 경우에는 位置 形狀 分布等의 狀態에 따라 破壞力學的 手法에 今後의 使用條件을 判定하고 必要에 對應하는 對策을 實施하여야 한다.

3.2 Shaft Core Teeth 部

最近 注目되고 있는 Rotor Shaft 經年劣化의 하나로 Shaft Core Teeth 部의 Fretting 疲勞가 있다. 유럽에서는 Shaft Core Teeth 部의 Fretting 疲勞

의 Crack가 中心孔까지 到達했다는 事故例를 報告한바 있다. 日本에서도 微少 Crack가 發生되 除去修理한 例가 있으므로 定期的으로 UT檢査, MT檢査를 實施하여 健全性を 確認할 필요가 있다.

3. 3 Rotor Shaft Journal 部

近年 電力系統의 大容量化, 長距離化, 構成의 複雜多樣化에 따라 Shaft비틀림 振動은 重要한 問題로 되고 있다. 電力系統事故나 그에 따른 高速再開路의 採用 또는 直列 Condenser 補償系統에서의 低周波共振現象 등으로 因해 發電機軸系에는 過大한 變動Torque를 誘發하여 그反復에 依해 Shaft Journal部等に 비틀림疲勞가 累積된다. 이 때문에 軸系의 비틀림振動 擧動의 正確한 파악과 비틀림疲勞 壽命을 精密하게 파악할 필요가 있다. 이 要求에 따라 最近에는 軸비틀림 疲勞壽命을 평가하는 System으로서 軸비틀림 振動監視裝置가 開發되어 實機에 適用될 豫定이다.

3. 4 Rotor Wedge

Rotor Wedge는 高速回轉中の Rotor Coil을 保持하는 重要한 部品으로 遠心力에 依한 높은 應力을 받는다. 荷重, 應力集中 條件에 依해 疲勞, Creep 龜裂, 起動停止 回轉의 累積에 依한 疲勞龜裂과 長時間 運轉에 依한 Creep 龜裂로써 不安定破壞에 이르는 것으로 報告된바도 있다.

따라서 Rotor表面 渦電流에 依해 Wedge가 過熱되는 異常運轉後에는 勿論 頻繁한 起動停止를 했을 경우에는 點檢을 實施함과 同時에 殘余壽命評價를 實施하여 必要에 따라 對策을 講究하여야 한다.

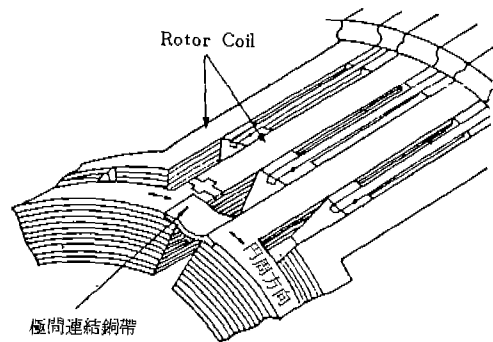
3. 5 End Ring

近年 유럽에서 18Mn- 5 Cr系의 合金鋼製의 End Ring이 應力腐蝕龜裂(SCC : Stress Corrosion Cracking)에 依한 破損事故가 數件이나 發生한 例가 있다. 事故原因으로서 Rotor 保管時 大氣中の 濕氣가 結露 또는 水冷 Rotor의 漏水를 들고 있다. 따라서 發電機의 長期停止時나 分解點檢時에 結露現象을 防止하는 措置를 取하여야 한다.

특히 既設機에서 過去の 保管, 設置, 運轉保守의 履歷이 不明確할 경우에는 非破壞檢査에 依해 健全性を 確認할 必要가 있다. End Ring의 SCC의 豫防保全은 防濕對策이 重要하며 特殊條件下에서 使用되는 發電機에서는 耐SCC特性이 優秀한 新材料(18Mn-18Cr Anstentite鋼)와 使用되고 있다.

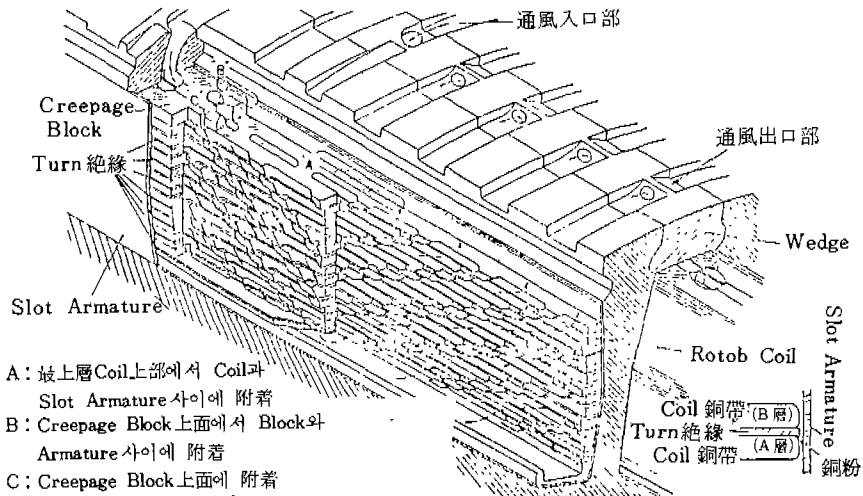
3. 6 Rotor 極間接續銅帶

Rotor極間接續銅帶는 頻繁한 起動停止와 運轉中 回轉遠心力에 따라 伸縮하게 되어 反復應力으로 疲勞龜裂이 發生된다. 따라서 定期的으로 目視點檢을 實施하여야 하며 壽命評價를 施行하여 必要에 따라 長壽命構造로 改善된 接續銅帶로 交替하여야 한다.



3. 7 Slot 內 Coil 銅帶

最近 日本에서는 發電機 定期點檢時에 分解된 Rotor Creepage Block 周邊에 銅粉이 發見되었다. 이 銅粉은 電氣的으로 同一 Turn을 構成하는 複層重疊Coil 銅帶間에서 Turning 時에 Coil自重에 依한 面壓下에서 Slip가 생기기 때문에 摩耗되어 發生되었다고 推定하였다. 銅粉이 推積量이 增加하면 層間短絡, Rotor接地 또는 Coil間 短絡에 이를 可能性이 있다고 報告되었다. 外國에서는 基礎試驗과 實機調査結果로 부터 Turning 累計時間으로 Coil 摩耗量을 概略 推定하여 Turning 時間等を 基準하여 Rotor Slot內的 點檢을 하고 그 結果에 따라 對策을 取한다고 한다.



銅粉附着狀態說明圖

4. 固定子 Coil

Turbine 發電機의 Stator Coil 絶緣은 信賴性 및 壽命을 左右하는 重要한 事項이므로 그 絶緣 強度를 早期에 豫測하여 適切한 對策을 세우기 위해 絶緣 評價가 매우 重要하다.

Stator Coil에는 Mica를 基材로한 絶緣 System이 採用되고 있으며 Mica屬의 接着材로서 以前에는 熱可塑性의 天然 Resin인 Asphalt Compound가 使用되었으나 最近에는 熱的 電氣的, 機械的으로 優秀한 Epoxy Resin으로 代置되었다.

Stator Coil은 鐵心 Slot 內에 固定하기 위하여 絶緣性의 Spacer를 使用하여 Wedge로 固定시키지만 經年의 絶緣物 및 Wedge 自体가 劣化, 收縮等에 의해 느슨해지게 된다. 이런 경우 固定子 Coil은 振動防止 效果가 低下하여 鐵心 Slot 內에 電磁力에 의한 Coil 相互間의 振動이 增加하여 Coil 絶緣層에 電氣的 機械的 損傷이 發生하여 Coil 壽命을 短縮한다.

Rotor 引出時에는 Test Hammer를 使用하여 全 Wedge를 打音 Check하여 Wedge의 느슨하게 되어 움직이는 程度를 確認할 必要가 있다. Wedge의 補修 基準은 다음과 같이 施行한다.

가) 同一 Slot 內에 2個以上 連續된 움직임이 있

을 경우 Slot 單位로 交替補修

나) 全體的으로 15% 以上의 Wedge가 움직일 경우 全 Wedge를 交替補修

다) 上記 以外의 움직이는 Wedge는 Epoxy Resin에 의해 固着補修 하면 된다.

一般的으로 Coil의 絶緣은 熱的, 電氣的, 環境的 機械的 要因에 의해 經年的으로 劣化된다.

1) 熱劣化는 熱에 의해 合成 Resin이 分解되어 Gas化하여 消散되어지는 劣化

2) 電氣劣化는 絶緣物中의 Void 內에서의 部分放電에 의한 劣化

3) 環境劣化는 腐蝕性 Gas, 水分, 油, 放射線等의 使用 汚穢氣가 要因으로 되는 劣化

4) 機械劣化는 起動停止時의 導體와 絶緣物의 熱膨脹差에 따라 發生하는 熱應力에 의한 劣化이며 Heat Cycle 劣化라고도 한다.

표 2는 現在 利用되고 있는 絶緣診斷技術을 表示한 것이며 이중 가장 많이 利用되는 몇가지 技術을 紹介하고자 한다.

4.1 非破壞試驗法

Stator Coil의 絶緣壽命評價方法으로서는 非破壞試驗法이 널리 採用되고 있다. 非破壞試驗法에 의

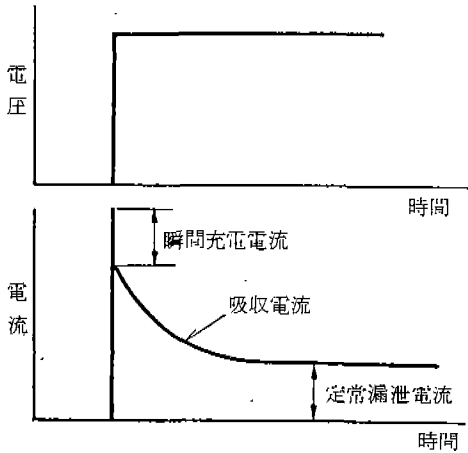
〈丑-2〉 回轉機 絶緣診斷試驗

- 絶緣診斷
 - 破壞試驗
 - 耐電壓試驗：交流電壓試驗，直流電壓試驗，衝擊電壓試驗
 - 極低周波數電壓試驗
 - 非破壞絶緣：直流試驗，誘電正接試驗，交流電流試驗
 - 特性試驗 部分放電試驗，異常電壓測定試驗
 - 物理，化學的試驗：熱重量分析，赤外分光分析，機内 Gas monitoring
 - 外觀檢査
 - 運轉履歷調査

한 絶緣診斷은 直流試驗 交流試驗，誘電正接試驗，部分放電試驗을 施行하여 絶緣의 劣化度를 判定한다.

가) 直流試驗

絶緣物에 直流電壓을 印加하여 成極指數 (PI) 를 測定하여 吸濕의 程度를 判定한다. 成極指數는 1.5 以上이 普通이고 1.5 以下의 경우는 吸濕狀態로 判定하고 乾燥處理가 필요하다.



直流電壓印加에 의한 吸收電流

成極指數에 의한 乾燥程度의 判定

乾燥程度	成極指數 PI
乾燥	2.5以上
普通	2.5~1.5
吸濕	1.5以下

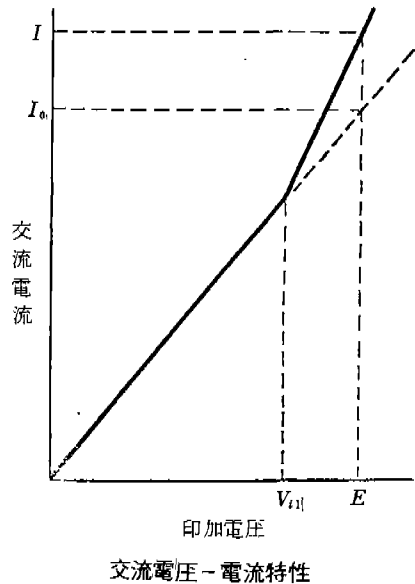
$$\text{成極指數} = \frac{\text{電壓印加 1 分後의 電流}}{\text{電壓印加 10 分後의 電流}} = \frac{\text{電壓印加 10 分後의 絶緣抵抗}}{\text{電壓印加 1 分後의 絶緣抵抗}}$$

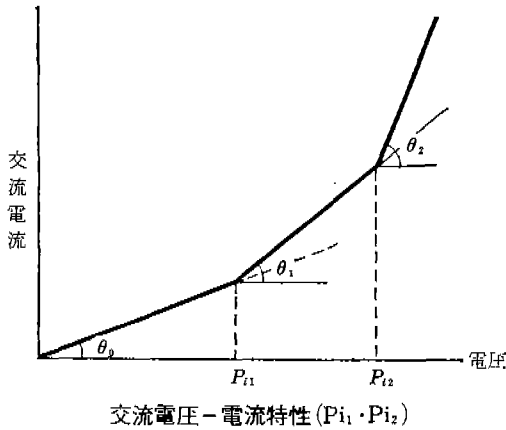
나) 交流電流試驗

絶緣物에 交流電壓을 印加하여 電壓을 增加 시키면 充電電流가 比例하여 增加한다. 그러나 絶緣物内에 Void가 存在할 경우는 Void内에서 部分放電이 일어나 Void를 短絡하므로 充電電流는 比例以上으로 急增하여 電壓電流 特性에 屈曲點이 생기게 된다. 이 電流急增電壓 및 電流增加率에서 劣化의 程度를 判定할 수 있다. 電流增加率 ΔI 는 定格電壓 E 에 대한 實測充電電流 I와 充電電流가 直線的으로 增加했다고 假定한 경우의 電流 I_0 를 使用하여 다음式으로 定義된다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 (\%)$$

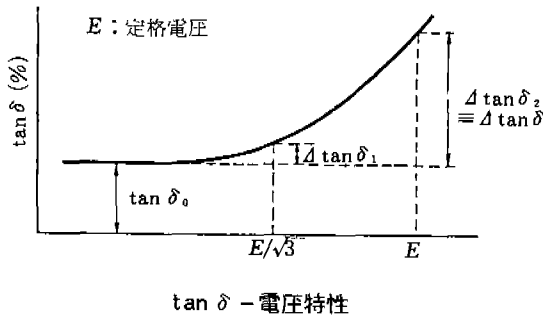
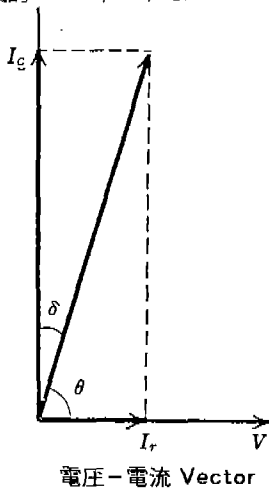
比較의 劣化가 進展된 Coil絶緣에서는 2個의 電流增加電壓이 나타나는 것이 많고 각각 第一電流急增點 P_{i1} 및 第二電流急增點 P_{i2} 라고 부른다. P_{i1} 은 Void内 放電으로 P_{i2} 는 Void間 橋絡하는 放電에 起因한다고 말하고 있다. 一般의으로 絶緣劣化의 進行之에 따라 P_{i1} , P_{i2} 는 低下하고 ΔI 는 增加한다.





다) 誘電正接試驗 (tanδ 試驗)

絶緣物에 交流電壓을 印加하면 絶緣物에서의 損失로 因해 全電流I는 充電電流I_c보다 δ만큼 늦어진다. 一般적으로 작으며 Sinδ ≃ tanδ 로 되어 絶緣物



에서의 損失W는 다음式으로 된다.

$$W \approx W_c \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan \delta$$

여기서 C는 絶緣物의 靜電容量, W는 電源電壓의 角周波數이다. 따라서 損失은 誘電正接 tanδ에 比例한다. 絶緣物中에 Void가 存在하는 경우는 印加電壓이 높게 되면 Void內에서 部分放電이 일어나 放電電流가 흘러 tanδ는 增加한다.

이것으로 부터 定格電壓에 있어서의 tanδ와 部分放電을 이르지 않는 낮은 電壓(通常0.2E)에서의 誘電正接 tanδ₀와의 差 Δtanδ을 利用하여 平均的인 Void生成狀態를 推定한다. 이 Δtanδ는 劣化의 進行에 따라 增加하므로 絶緣劣化의 判定上 重要한 情報이다.

라) 部分放電試驗

지금까지 記述한 試驗法은 絶緣物의 平均的 劣化 檢出에 關한 것이다. 絶緣의 劣化는 局部的으로 進行하는 것도 있어 이 部分的인 劣化를 檢出하는 試驗도 重要하다.

部分放電試驗은 絶緣物中의 弱點인 Void나 龜裂로 發生하는 部分放電의 Pulse電流을 檢出하여 그 크기, 發生頻度, 放電開始電壓 등에서 絶緣劣化狀態를 判定하는 것이다. 發電機에서는 이중에 最大放電電荷量 Q_{max}의 電壓特性을 測定하는 것이 普通이다. 龜裂等과 같이 局部的인 결함이 存在할 경우에는 放電Pulse 波高值가 크고 發生頻度가 增大한다. Δtanδ가 比較的 적은데도 Q_{max}가 대단히 클 경우에는 局部的 欠陷이 存在하고 있다고 볼 수 있다.

非破壞試驗法에 의한 絶緣劣化의 判定은 長期間 運用한 發電機에서 拔取한 Coil의 非破壞絶緣 特性과 破壞電壓의 相互關係를 事전에 알아 두고 그 關係와 試驗結果에서 破壞電壓을 推定하며 劣化의 狀態를 判定한다. 非破壞試驗法은 絶緣劣化에 의해 생기는 Void의 含有率과 破壞電壓의 密接한 關係에 따르고 있으므로 모든 Void가 放電되는 높은 電壓을 印加할수록 診斷精度는 높아진다. 그러나 高電壓의 印加는 絶緣에 損傷을 주는 것이므로 印加電壓을 낮게 抑制하여 診斷精度는 低下된다.

合成 Resin은 經年劣化에 의한 事故例가 거의 없

絶縁劣化判定基準

最高試験電圧 (kV)	E		1.25E/√3	
定格電圧 E (kV) 3.3	6.6	11	6.6	11
$\Delta \tan \delta$ (%) 0.6	6.5	6.5	0.9	2.5
ΔI (%) 4.0	8.5	12.0	2.5	5.0
Q_{max} (Coulomb)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}

기 때문에 Asphalt Compound 絶縁 만큼 豊富한 Data 가 없다. 合成 Reein 絶縁의 判定基準은 絶縁開發時의 諸Data나 Coil製作時의 試驗Data를 基準으로 하

고 있다. 今後 實機 Coil에서의 諸Data에 의해 精度를 向上하여야 할 필요가 있다.

4.2 其他의 方法

Stator Coil의 絶縁壽命評價法은 이외에도 最近에는 物理化學的手法도 開發되고 있다. 이것은 絶縁物의 熱分析에 의해 殘余壽命을 判定하는 方法이고 今後에는 分析機器가 高性能化하는데 따라 發展할 것으로 期待된다. *

● 案 內 ●

'87년도 전기기사보수교육시행

1. 교육대상

- '82년도 전기기사 자격등록을 한 자
- '82년도 이전에 등록한 자로서 '86년도까지 본교육을 이수하지 아니한 자(단 전기사업법에 의한 전기 보안담당자 교육이수자는 제외)

2. 지역별 교육일정

지역별	교육일정	실시회수	교육신청기간	대상지역
대전	87. 4. 20-21	1	87. 3. 2~4. 15	충북, 충남
광주	4. 23-24	1	"	전북, 전남
대구	4. 27-28	1	"	대구, 경북
부산	4. 30-5. 1	1	"	부산, 경남
서울	5. 12-5. 22	4	4. 1~5. 10	서울, 경기, 인천, 제주, 강원

3. 수강료 : 15,000원 (교육수강신청시 납부)

4. 교육신청접수처

- 안양 • 43-1064 인천 • 525-0075 대구 • 44-3116
- 마산 • 92-6842 부산 • 804-6454 전주 • 3-3287
- 광주 • 33-7398 청주 • 64-2845 제주 • 22-3003
- 대전 • 22-0083 강원 • (서울) 274-1661. 서울 • 274-1661

5. 기 타

- 수강신청접수시 자격증 지참
- 기타 자세한 사항은 서울274-1661(교육과)로 문의 바람

1987. 2. 대한전기협회