



# 電力系統 安定度

## Power System Stability

權 世 懣

高麗大學校 工大 電氣工學科 助教授

### 1. 序 論

産業化된 現代社會에서 必要한 에너지중 電氣에 에너지가 차지하고 있는 比重은 나날이 커지고 있다. 電氣에 에너지를 生産하고 供給하는데 가장 큰 關心事의 하나는 良質의 電力을 供給하는 일이다. 卽 需用家에게 停電없이 定周波數, 定電圧의 電力을 供給하는 것이다.

電氣에너지는 貯藏性이 없어서 需用家の 總電力 需要(Load Demand)에 따라 電力生産을 調節하여야 하는 特性이 있다.

요사이 超電導(Superconductivity)技術의 發達로 에너지 貯藏을 위한 모델플랜트의 建設等이 推進되고 있지만 아직까지 實用化된 段階는 아니라고 생각된다.

우리나라의 경우에 原子力發電所들이 繼續 建設中에 있으며, 既存 原子力 發電所의 容量도 全体容量에서 相當한 部分을 占하고 있으며, 장래에 원자력 발전소의 비중이 더욱 더 커질 전망이다.

원자력 발전소는 그 특성상 풍부한 冷却水를 얻기 쉬운 위치에 있어야 하고, 地形的으로도 주위에 미치는 영향을 極小化할 수 있는 位置에 있어야 하기 때문에 負荷密集地域인 大都市 및 工業團地 등에서 원거리에 있다. 그리고 經濟的인 側面에서 大容量이어야 하기 때문에 發電機의 脫調時 또는 連結送電線의 事故時에는 全体系統에 중전보다 큰 安定度問題가 야기될 것으로 展望된다.

### 2. 電力系統 安定度

電力系統의 安定度(Stability)를 系統運用의 側面에서 定義하면 發電機가 定常狀態에서 同期狀態(Synchronism)를 維持할 수 있고 큰 系統교란(Disturbance)이 일어난 이후에 同期狀態로 復歸하여야 한다.

定常運轉中에도 電力系統에는 작은 규모의 계통교란이 發生하므로, 이에 起因한 發電機의 振動(Oscillation)은 신속히 감쇠되어야 한다. 이를 定態安定度(Steady-State Stability)라고 한다. 또한 이

를 작은 계통교란에 대한 安定度 (Small-disturbance Stability)라고 하기도 한다.

電力系統內的 主要 送電線이 故障으로 遮斷되거나, 大容量의 發電機 유닛이 트립되거나, 負荷移轉 (Load Transfer) 등의 대규모의 교란이 일어났을 경우에는 過渡狀態가 지난 후에 各 發電機가 同期狀態로 復歸할 수 있어야 한다. 이를 過渡安定度 (Transient Stability) 또는 큰 계통교란에 대한 安定度 (Large-disturbance Stability)라고 한다. 이러한 큰 계통교란이 일어날 確率 (Probability)은 적을 것이며, 系統이 安定度面에서 견디어 낼 수 있는 큰 규모의 우발사고 (Contingency)는 미리 選定해 두어야 할 것이다. 그리고 특정 계통교란 이후에 系統이 安定할 것인지는 계통교란시의 動作條件에 좌우된다. 系統負荷, 發電스케줄, 系統의 연계상태 및 保護繼電方式이 달라진다면 같은 계통교란에 대해서도 전혀 다른 結果를 招來할 수 있다. 그러므로 過渡安定度 解析으로는 特定 動作條件에서 特定 계통교란에 대해서 同期機가 同期狀態를 維持할 수 있는가라는 結論을 내릴 수 있을 뿐이다.

電力系統을 計劃하고 運用하는데 있어서는 過渡安定度 問題와 定態安定度 問題를 둘다 充足되도록 하여야 한다.

定態安定度を 動態安定度 (Dynamic Stability) 라고 定義하기도 한다. 安定度 問題를 이렇게 나누는 것은 各各에 對한 數學的 表現의 假定과 近似化 條件들이 다르기 때문이다. 過去에는 計算手段의 未備로 두개의 별개의 문제로 보는 경향이 있었으나, 디지털 컴퓨터의 性能向上과 모델링 技法의 發展에 힘입어 系統內的 어떤 機器 및 素子도 具體적으로 表現할 수 있으며, 빠른 計算이 可能해졌다. 그리고 大電力系統에서는 계통교란이 波及되는데 數秒의 時間이 所要된다. 만약 한 地域에서 일어난 계통교란이 다른 地域의 또다른 계통교란을 야기한다면 安定度問題는 더욱 惡化되어 連鎖的인 波及效果에 의하여 大規模의 停電으로 이룰수도 있다. 그러므로 大規模 電力系統의 安定도는 比較的 긴 時間帶에 대해서 考察하여야 하며, 過渡安定度 解析에서 무시했던 機器 등의 動作特性을 포함하는 動態安定度 解

析을 해야할 必要性이 있다.

### 3. 安定度解析方法

#### 3.1 過渡安定度 解析

發電機는 固定子에 a, b, c相의 3捲線과 回轉子에 界磁捲線 (Field Winding) 및 制動捲線 (Damper Winding) 등이 電磁結合 (Electromagnetically Coupled)되어 우리가 원하는 次數의 非線形 微分方程式으로 表示할 수 있다.

固定子 捲線과 回轉子捲線은 相對的으로 同期速度에 가깝게 運轉되고 있으므로 通常 a, b, c捲線을 o, d, g捲線으로 變換한다. 이러한 變換 (Transformation)을 Park 變換 이라고 한다. 요사이는 過去의 Park 變換대신 直交Park 變換을 使用하고 있다. Park 變換을 하면 固定子の 等價 o, d, g捲線과 回轉子捲線을 聯關하는 電流-磁束鎖交數 行列에서 時間에 關聯된 項들이 제거되며 對稱行列로 만들 수 있어 解析이 容易하다는 利點이 있다.

平衡系統인 경우에 發電機의 動的特性은 7次에서 2次까지 多様な 모델로 나타낼 수 있다.

系統負荷를 어떤 모델로 나타내는가도 安定度 解析에 큰 영향을 미친다.

通常 大容量 電動機를 제외한 負荷는 임피던스나 어드미턴스로 나타내거나 力率이 일정한 定電流로 表示하거나 또는 有効 및 無効電力이 一定한 것으로 나타낼 수 있다. 이상 언급한 세가지 類型을 組合하여 負荷를 表現하기도 한다.

그리고 發電機의 狀態變數를 調節하는 各種 制御 機器의 動作特性도 適切한 모델로 表示한다. 應答速度가 빠른 自動電壓 調整器 (Automatic Voltage Regulator)가 使用되기 시작한 후 신속한 電壓變動이 可能해져서 보다 더 經濟的으로 系統을 設計하고 運用하는 것이 可能하게 되었다. 그러나 그 結果 系統內的 各發電機들이 各自의 定態安定限界值 (Steady-State Stability Limit)에 아주 가까운 狀態로 運用됨으로써 다른 系統교란이후 不安定하게 되는 새로운 形態의 安定度問題가 提起되게 되었다.

HV-DC 링크 및 靜止型 無効電力 補償機(Static Var Compensator) 등의 制御機器 등의 動作特性도 모델화를 하여야 한다.

Fast Turbine Valving, 連續 또는 不連續의 勵磁系統 制御, Dynamic Braking, 發電電力과 負荷電力의 削減, 캐패시터 뱅크나 리액터의 스위칭 및 Re-closing 등의 現象等도 모델화를 하여야 한다. 임피던스, 指向性 過電流 繼電器等의 保護繼電系統의 動作特性도 安定도에 큰 영향을 미친다.

만약 시뮬레이션하는 時間帶가 길어지게 되면 應答速度가 느린 系統의 動作特性, 即 보일러의 動作特性, 水力發電所의 Penstock 및 Conduit의 動的特性 및 周波數 保護繼電系統의 動的特性도 考慮해야 한다.

이상 언급한바와 같이 系統內의 各 構成要素들을 전부 모델화하면 방대한 규모의 非線形 微分方程式 및 代數方程式으로 풀어야 한다. 通常적으로는 安定度解析의 目的에 따라서 特定 動作條件과 特定계통고란에 대해서 영향을 작게 미치는 構成要素들은 簡略化시켜서 全体 計算量을 줄인다. 실제로 數千 버스(Bus) 및 數百個의 發電機로 構成된 큰 系統을 풀 수 있는 安定度 프로그램패키지가 사용되고 있다. 韓電의 경우에도 PSS/E 프로그램을 사용하고 있다.

이와 같이 系統方程式을 數值的으로 풀어서 時間領域에 對한 解를 求하는 方法은 各 構成要素를 細部的인 것까지 具體적으로 모델화를 할 수 있고 時間 應答를 얻는다는 長點도 있으나 短點도 있다.

即 系統定數(System Parameter)의 變化가 얼마만큼 安定도에 영향을 미치는가, 즉 感度에 對한 情報를 얻을 수 없으며 計算速度가 늦다. 그리고 特定 계통고란 및 特定 動作條件에 대해서만 系統의 應答과 安定한가, 不安定한가를 알 수 있으며 얼마만큼 安定한가를 알 수 없다.

근래에는 에너지 函數를 利用한 Liapunov法을 應用하여 系統의 微分方程式을 풀지 않고 安定度を 判別하는 直接安定度解析法(Direct Stability Analysis)에 대한 研究가 進展되어서 證據에는 不可能하다고 생각했던 많은 問題點들이 解決되어 가고 있다. 直

接法은 計算速度가 빠르고 얼마만큼 安定한가를 計算할 수 있고 計劃段階에서 提示된 여러가지 案에 대하여 安定度の 側面에서 優先順位를 정하거나 想定事故의 加혹도에 따라 優先順位를 定하는데 活用될 수 있다.

그러나 發電機의 動作特性을 具體적으로 나타낼 수 없고, 古典 發電機모델(Classical Model)로 表現되며 기타 負荷의 動的特性이나 構成要素들의 動作特性을 表現하기 어렵다는 制約이 있다. 現段階에서는 時間領域에 對한 過渡安定度 解析方法을 補完하여, 計劃 및 運用段階에서 時間領域 시뮬레이션의 計算回數를 줄이도록 케이스를 選別하는 役割을 할 수 있다. 그리고 非常時 系統運用 擔當者에게 빠른 速度로 近似值를 提供할 수 있으므로 온라인(On-line)으로 系統의 安定度を 評價하는데 活用되고 있다.

### 3. 2 定態安定度 解析

系統고란이 작은 경우에는 發電機의 動作特性을 表示하는 非線形 微分方程式을 特定 初期動作點에 對해서 線形化할 수 있다. 即  $\dot{X} = AX + BU$ 의 形態로 나타낼 수 있다. 따라서 制御理論에서 定立된 많은 定理를 利用할 수 있고 安定度を 判別할 수 있다. 실제로 많이 사용되고 있는 簡略화된 線形모델은 다음과 같은 假定하에 誘導된다.

即 制動捲線의 效果는 무시하며 固定子 捲線의 抵抗成分도 무시한다.

d軸과 q軸 捲線에 誘起되는 變壓器 起電力成分(Transformer E. M. F.)  $\lambda d$ 와  $\lambda q$ 는 速度起電力成分(Speed E. M. F.)  $\omega \lambda q$  및  $\omega \lambda d$ 에 비하여 대단히 적기 때문에 이를 무시한다.

그리고 계통의 주파수는 60(Hz)로 維持하는 것으로 假定하고 系統은 平衡狀態에 있다고 假定한다. 특히 發電機의 飽和特性(Saturation Effect)은 무시한다.

이상의 假定은 한개의 發電機가 送電線을 通하여 無限大 母線(Infinite Bus)에 連結되어 있을 경우이다.

線形화된 系統方程式의 固有值(Eigenvalue) 및 固

右벡터(Eigenvector)를 決定하면 振動에 포함되는 모든 모드를 찾을 수 있다. 固有値는 각 진동모드의 周波數 및 감쇠정수를 나타내며 不安定하거나, 감쇠가 만족스럽지 못한 모드를 찾아낼 수 있다.

각 진동모드와 系統定數 및 變數의 關聯性을 파악할 수 있고, 安定度問題의 原因을 究明하여 解決方案을 찾을 수 있다. 그리고 制御器의 設計 또는 機器의 모델을 決定하는데 必要한 周波數 應答(Frequency Response)도 쉽게 얻을 수 있다.

그리고 系統定數와 動作條件에 對한 臨界固有値의 感度(Sensitivity)도 구할 수 있으므로 系統의 動的特性을 파악하는데 큰 役割을 하고 있다.

系統行列은 疎行列(Sparse Matrix) 이긴 하지만 非對稱이며, Newton-Raphson 法으로 電力潮流計算을 하는 경우같이 特別한 構造(Sparsity Structure)를 갖지 않기 때문에 疎行列의 計算法을 適用할수 없으므로 數百個 以上の 狀態變數로 表示되는 大系統에는 컴퓨터 기억용량의 制約 등으로 適用하기가 어렵다.

이를 補完하기 위하여 全系統 應答를 代表하는 모드를 選擇하여, 이 모드의 固有値를 구하는 프로그램이 AESOPS (Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems) 프로그램이다.

發電機의 回轉子에 固有値의 初期推定値로 나타낸 外部토크가 가해졌다고 보고 複素周波數 應答를 代數方程式을 풀어서 計算한 다음 固有値의 다

음 推定値를 求하는 計算段階를 推定値의 誤差가 許容誤差 범위안으로 수렴될 때까지 反復計算한다.

臨界모드에 關聯된 固有値만을 求하기 때문에 大電力系統인 경우에도 記憶容量이 적고 効率的인 計算을 할 수 있는 반면에 收斂性 問題 및 모든 重要한 모드를 確認 評價할만한 體系의인 방법이 없어서 臨界모드를 찾을 수 없는 경우가 있는 결점이 있다.

#### 4. 檢討 및 要約

이상으로 電力系統 安定度問題는 계통교란의 크기에 따라 過渡安定度 및 定態安定度問題로 大別할 수 있으며 이는 系統狀態 方程式이 非線形 또는 線形으로 나타난다는 差異가 있다는 것을 알 수 있다.

실제 計算을 수행하는 안정도프로그램도 각각 制限이 있어서 각 解析方法들이 相互補完하는 役割을 한다고 볼 수 있다. 安定度問題를 研究하고자 할 때에는 系統의 條件이나, 研究目的에 따라 올바른 解析法을 適用하여야 할 것이며 이를 위해서는 각 방법별로 限界點 및 長短點을 파악하여야 한다고 생각된다. 그리고 計算된 答도 실제 모델링한 構成要素의 모델의 次數, 特定 動作條件 및 계통 교란의 크기 및 종류, 系統負荷의 表現에 따라 다르므로, 이를 考慮한 올바른 結果分析이 必要한 것으로 생각된다. \*

### ● 알 림 ●

## 感電·火災事故 무료조사 실시

當協會는 會員에 대한 權益보호와 奉仕活動의 一環으로 當協會 會員社 또는 會員이 所屬한 自家用電氣工作物에서 感電 또는 火災事故가 발생하였을 때 要請에 依하여 事故 原因調査를 無料로 實施하고 있습니다. 會員여러분의 많은 利用 있으시기 바랍니다.

社團法人 大韓電氣協會