

電力系統의 안정度 解析方法

權世嫻

(高麗大 工大 教授)

차례

1. 序論
2. 過渡안정度 解析方法
 - 2.1 非線形 時間領域 解析
 - 2.2 直接法
3. 定態안정度 解析方法
 - 3.1 固有值 解析
 - 3.2 振動모드의 選擇解析
 - 3.3 大電力系統의 固有值解析
4. 檢討 및 要約
 - 參考文獻

1. 序論

産業化된 現代社會에서 必要한 에너지 중 많은 部分이 電氣에너지의 形態로 供給되고 있다. 電氣энер지를 生産하고 配給하는데 가장 큰 關心事는 良質의 電力을 供給하는 일일 것이며 卽, 停電없이 定周波數, 定電壓의 電力을 供給하는 것이다.

電力系統이 定常적으로 運轉될 때는 系統內의 各發電機들은 같은 速度로(電氣的으로) 運轉되며 同期狀態를 維持한다. 만약 發電機들이 定常적인 平衡點에서 벗어나 振動하거나, 同期狀態가 維持되지 못할 때, 周波數나 系統電壓이 定常值에서 벗어나게 된다. 發電機나 送電線等이 系統에서 分離될 경우, 系統이 弱化되고 供給電力과 需要間에 不平衡이 생겨서 큰 事故로 波及될 우려가 있다.

電力系統의 安定度(Stability)를 簡單히 定義하기는 어렵지만, 系統運用的 側面에서 보면 다음과 같다. 卽, 發電機의 安定度는 發電機가 定常狀態에서 同期狀態를 維持할 수 있고, 큰 系統교란 이후에 同期狀態로 復歸할 수 있겠느냐는 것이다.

가. 定常運轉中에도 系統에는 恒常 작은 교란이 發生하므로, 이에 起因한 發電機의 振動(Oscillation)은 신속히 減쇠되어야 한다. 이를 定態안정度(Steady-State Stability)라고 한다.

나. 系統內에 事故가 생기거나 負荷移轉(Load Transfer) 등의 대규모 교란이 일어났을 경우 過渡狀態가 지난 후에 同期狀態로 復歸할 수 있어야 한다. 이를 過渡안정度(Transient Stability)라고 한다.

卽, 定態안정度는 작은 계통교란에 대한 安定度(Small-disturbance Stability)이고, 過渡안정度는 큰 계통교란에 대한 安定度(Large-disturbance Stability)라고 할 수도 있다. 發電機를 安定한 狀態로 維持하는 것이 系統 運用に 있어서 매우 重要한 일이다.

電力系統의 安定度 問題에 대한 認識을 하게 된 것은 同期發電機들을 最初로 並列運轉할 때였다. 이때 發電機의 自發的인 振動現象(亂調 또는 hunting)이 發見되었으며, 原因을 규명한 結果 制動(damping)이 不充分했던데 起因된 것으로 判明되었다. 이를 補完하기 위하여 發電機에 制動捲線(Damper Winding)을 設置하였고, 또한 原動機(Prime Mover)를 보다 더 바람직한 回轉力—速度特性을 가진 터어빈型으로 代替하게 되었다. 그 이후 간혹 偶發的으로 不足勵磁 運轉하는 경우를 제외하고 일단 安定度 問題는 解決된 듯 보였다.

自動電壓 調整器(Automatic Voltage Regulator: A. V. R.)가 使用되기 始作한 이후 새로운 形態의 安定度 問題가 題起되게 되었다. 即, 리액턴스가 커서 同期化力(Synchronizing Power)의 限界値가 작은 경우에도 A. V. R.을 使用하여 신속히 電壓을 變動시킬 수 있으므로 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의 各發電機들이 各自의 定態安定 限界値(Steady-state Stability Limit)에 아주 가까운 狀態로 運用됨으로서, 系統事故나 다른 系統교란이 發生한 후에 不安定하게 되는 경우가 생기게 되었다. 이러한 形態의 安定度 問題는 定態安定도와 過渡安定도의 兩面性이 있어서 定態安定도의 余裕(margin)가 系統교란을 견딜 수 있는 指標로 여겨지게 되었다.

그리고 系統間의 연계가 強化되고 高速應答性을 가진 勵磁系統(Excitation System)이 採用됨에 따라 때때로 振動이 負로 減衰가 되는 경우가 생기게 되었다. 이러한 경우를 分析하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션(Simulation)을 할 경우에도 振動이 실제로 減衰하는지를 確認하기 위하여 중전보다 오랜 時間帶에 대하여 시뮬레이션을 해야 할 必要가 생기게 되었다. 그리고 負의 댐핑은 應答持性이 빠른 制御器에 起因하므로, 妥當性있는 結果를 얻기 위해서는 모든 댐핑源을 시뮬레이션하여야 하므로 중전보다 시뮬레이션 프로그램이 방대해지게 되었다. 여기서는 現行 安定度 解析方法을 安態安定

도와 過渡安定도의 두 分野로 大別하여 整理하고 各分野에 대한 研究動向도 간단히 소개하고자 한다.

2. 過渡安定度 解析方法

이미 언급하였지만 過渡安定도는 큰 系統교란이 일어났을 경우의 安定度이므로, 系統應答에 큰 영향을 미치는 다음의 要因들을 適切히 모델화를 하여야 할 것이다.

가. 發電機와 負荷의 動的 特性.

나. 發電機, HV-DC Link 및 靜止型 無效電力 補償機(Static Var Compensator) 등의 制御器.

다. Fast Turbine Valving, 連續 또는 不連續 勵磁系統 制御, Dynamic Braking, 發電電力과 負荷電力의 削減, 캐패시터나 리액티의 스위칭 및 reclosing 등의 安定도를 위한 特別한 方法

라. 임피던스, 指向性 過電流 繼電器 등의 保護繼電器의 動作

만약 시뮬레이션되는 時間帶가 길어지게 되면 火力發電所의 보일러의 動的特性, 水力發電所의 penstock 및 conduit의 動的特性 및 周波數 保護繼電 系統도 모델화가 되어야 할 것이다.

2.1 非線形 時間領域 解析

이 方法은 現在 가장 보편적으로 쓰이고 있는 方法이다. 數值解析 方法으로 系統의 非線形 微分方程式 및 代數方程式을 풀어서 系統變數의 時間에 대한 應答을 구한다. 數千버스(BUS) 및 數百個의 發電機로 構成된 큰 系統을 풀 수 있는 컴퓨터 프로그램이 使用되고 있다.

微分方程式은 주로 Runge-Kutta 또는 Modified Euler 등의 方法으로 풀었으나 이러한 積分 方法은 數值解析的인 安定도가 弱하다는 缺點이 있다. 近來에 와서는 梯型公式(Trapezoidal Rule)을 많이 使用하는 傾向이며 이 方法은 數值解析的인 安定도가 높다는 長點이 있다. 時間增分(Increment)이 클때는 高周波모드는 瀘過해

버리고 低周波모드의 解를 正確히 구할수 있다. 그러므로 電力系統 應答의 短期 및 長期 시뮬레이션에 공히 적용될 수 있는 利點이 있다. 電力系統의 動的特性을 時間領域에서 구하는 가장 좋은 方法은 微分方程式은 위에서 言及한 梯形公式를 利用하여 풀고, 代數方程式은 뉴턴의 方法으로 푸는 것이라고 한다.

時間領域 解析方法의 長點은 다음과 같다.

가. 모델化를 하는데 制約이 없다. 각 機器를 세부적인 것까지 具體적인 모델化를 할 수 있다. 不連續적인 制御機能이나 保護繼電 機能도 쉽게 모델링할 수 있다.

나. 系統方程式에 대한 完全한 答을 구할 수 있다. 모든 系統變數 및 保護繼電器에 대한 時間應答을 얻을 수 있다.

時間領域 解析方法의 限界點은 다음과 같다.

가. 系統定數에 對한 感度에 관한 情報를 직접 얻을 수 없다.

나. 計算速度가 늦다. 컴퓨터 하드웨어와 數值解析法의 發達로 計算速度가 向上되고 있다고는 하지만, 이와 平行해서 계통모델이 複雜해 지고, 시뮬레이션 時間帶가 增加되는 추세이며, 系統의 더 많은 部分이 모델化되어야 하기 때문에 計算時間이 많이 걸린다.

다. 特定 系統고란에 대해서, 주어진 初期條件에 대해서만 系統의 動的 應答과 安定度에 대해서 알 수 있다. 얼마 만큼 安定한가는 알 수 없다.

이상 言及한 限界點때문에 具體적인 系統모델에 대한 時間領域解析은 많은 케이스에 대해서 研究하기에는 制約이 있으며 決定論的 接近方法(Deterministic Approach)이라고 할 수 있다.

이 보다 더 바람직한 方法은 確率論的 接近方法(Probabilistic Approach)인데, 보다 더 많은 케이스에 대해서 結果를 얻어야만 系統이 不安定해 지는 確率을 얻을 수 있으므로 計算時間이 大幅 短縮되어야만 하는 制約이 있다.

근래에는 에너지 函數를 利用한 解析方法에 대한 研究가 이루어 지고 있으며 많은 케이스

에 대한 計算結果를 보다 더 能率的으로 利用하고 安定한 領域을 결정하는데 必要한 計算回數를 줄이도록 하고 있다.

2.2 直接法

直接法(Direct Stability Analysis)은 系統의 微分方程式을 풀지 않고 安定度를 判定하는 方法이다. 최근 直接法에 대한 많은 研究가 이루어져 중전에 不可能하다고 생각되던 要因들이 解決되어 가고 있다. 直接法의 長點으로는

가. 計算速度가 빠르다.

나. 얼마 만큼 安定한가를 計算할 수 있다. 系統의 計劃段階에서 여러가지 案에 대하여 優先順位를 정하거나, 想定事故의 加혹도에 따라 優先順位를 결정할 수 있다.

그러나 現行의 直接法은 다음과 같은 制限이 있다.

가. 모델링에 制約이 있다. 即, 古典 發電機 모델만을 사용할 수 있으며, 負荷의 動的 特性이나 制御機能 및 기타 安定度를 위한 機能들을 表現할 수 없다.

나. 系統變數의 時間應答을 구할 수 없다.

다. 系統이 어떻게 分離되는가를 알 수 없고, 分離된 系統이 安定을 維持할지를 알 수 없다.

라. 保護繼電器의 動作을 監視하고 시뮬레이션하는데 必要한 임피던스, 線潮流 및 버스電壓을 計算할 수 없다. 繼電器의 動作은 系統의 順次的 崩壞를 일으킬 수도 있으므로 繼電器의 監視는 安定度에 있어 重要하다. 實際로 系統의 運用限界는 安定度の 限界보다 繼電器의 margin에 의하여 결정되어야 할 때도 있다.

마. 系統變數에 의하여 스위칭되는 自動機器(리액터나 캐패시터)등을 表現할 수 없다.

이상 言及한 制限點이 있지만 直接法은 時間領域 解析方法을 補完할 수 있다고 생각된다. 計劃 및 運用段階에서 時間領域 시뮬레이션의 計算回數를 줄이도록 케이스를 選別할 수 있다. 그리고 非常時 系統 運用을 담당한 사람에게 빠른 速度로 近似值의 結果를 提供할 수 있으므로 온라인(on-line)으로 系統의 動的 安定度를 評價할 수 있다.

3. 定態安定度 解析方法

過渡安定法 解析에 사용되는 時間領域 프로그램을 定態安定度 解析에도 사용할 수 있으나 다음과 같은 制約이 있다.

가. 振動에 포함된 여러 다른 모드를 찾기 어렵다. 時間에 대하여 관찰된 應答에서 減衰가 不良한 모드가 크지 않을 수도 있기 때문이다.

나. 振動이 커지고 있다는 것을 明確히 알기 위해서는 10초에서 15초 정도의 시뮬레이션을 하여야 하므로 計算費用이 많이 든다.

다. 時間領域 解析方法으로는 安定度問題의 性質을 充分히 把握할 수 없다. 그 原因을 究明하고 이를 改善할 方案을 찾기 힘들다.

定態安定度 解析을 위해서는 非線形의 系統方程式을 特定 動作點에 대하여 線形化하여, 線形系統의 安定度 判別方法을 利用할 수 있다.

3.1 固有值 解析

線形화된 系統方程式 ($\dot{X} = A X + B U$)의 形態의 固有值와 固有벡터를 決定하면 振動에 포함되는 모든 모드를 찾을 수 있다. 固有值는 各振動모드의 周波數 및 減衰定數를 나타내며 不安定하거나 減衰가 不良한 모드를 모두 찾아낼 수 있다. 그리고 각 振動모드와 系統定數 및 變數의 關聯여부를 알 수 있으며, 安定度問題의 原因을 究明하여 解決方案을 찾을 수 있다. 그리고 特定 制御方案의 設計 또는 機器의 模型을 決定하는데 有用한 周波數應答 (Frequency Response)도 쉽게 얻을 수 있다. 系統定數와 動作條件에 대한 臨界 固有值의 感度 (Sensitivity)도 구할 수 있으므로 系統의 動的特性을 把握하는데 큰 役割을 하고 있다.

그러나 固有值를 구하는 現行 프로그램은 컴퓨터 記憶容量이 多數 必要하며 系統行列이 疎行列 (Sparse matrix)이긴 하지만 非對稱이며 特別한 構造를 갖고 있지 않기 때문에 疎行列을 利用할 수 없기 때문에 數百개 이상의 狀態變數로 表現되는 系統에는 適用하기 힘들다.

固有值 解析 프로그램은 定態安定度の 限界

值 決定, 系統 安定器 (Power System Stabilizer)의 設計, 自動電壓 調整器 및 調速器의 動作點 決定, 비틀림에 의한 振動모드와 勵磁 및 原動機 制御와의 相互關聯에 대한 解析등에 사용된다. 그리고 온라인으로 周波數 應答을 測定하여 發電機模型을 알아내는데도 사용된다.

3.2 振動모드의 選擇解析

固有值 解析方法으로는 大電力 系統의 解析에 制約이 있으므로 이를 補完하기 위하여 全體 系統應答을 代表하는 모드를 選擇하여, 이 모드의 固有值를 구하는 方法이다. 美國 Electric Power Research Institute (EPRI)의 프로젝트로 開發된 AESOPS (Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems) 프로그램은 大系統의 振動研究에 사용된다. 周波數 應答法으로 發電機의 回轉子角과 關聯된 固有值를 구한다.

發電機의 回轉子에 固有值의 初期 推定值로 나타낸 外部토크가 가해 졌다고 보고 固有值를 구한다. 系統의 複素 周波數應答을 代數方程式을 풀어서 計算한다. 固有值의 다음 推定值는 線形系統應答으로 부터 計算하며, 推定值가 바람직한 許容誤差 범위안으로 收斂할때까지 이를 反復계산한다. 이렇게 얻어진 固有值는 選擇된 發電機가 影響을 크게 미친 振動모드를 나타낸다.

AESOPS 프로그램의 長點은

가. 臨界모드와 關聯된 固有值를 近似的으로 알 경우 大系統인 경우에도 正確한 값을 신속히 구할 수 있다.

나. 計算을 效率的으로 할 수 있고 記憶容量은 電力潮流計算時와 比較하여 약간 많은 정도에 불과하다.

또한 이 방법의 短點으로는

가. 모든 중요한 모드를 評價하였는지 確認할 體系的인 방법이 없어서 臨界모드가 發見되지 못하는 경우도 있을 수 있다.

나. 發電機 回轉子의 振動과 關聯된 모드만이 決定될 수 있을 뿐이다.

다. 固有值 計算時 꼭 收斂된다고는 할 수 없다.

라. 系統의 安定度を 向上하기 위하여 特定 制御方案을 세우는데 直接的으로 사용할 수 없다. 이상의 결점이 있지만, AESOPS 프로그램은 大電力系統에서 地域間的 低周波振動을 解析하는데 有用하다고 한다. 現行의 固有値解析 프로그램과 過渡安定度 프로그램을 補完하는 역할을 하고 있다.

3.3 大電力系統의 固有値解析

電力系統이 방대한 경우에는 3.1에서 言及한 固有値 計算方法으로는 限界가 있으므로 系統을 여러개의 地域으로 分割하여 놓고, Tie-line을 open한 상태 또는 無限버스(Infinite Bus)에 연결되어 있다고 보고 各地域의 固有値 解析을 한다. 다른 地域과 關聯한 모든 모드와 特定問題에 重要하다고 생각되는 다른 모드를 포함시키도록 하는 低次의 모델을 세운다. 次數가 줄어든 各 地域모델을 원래대로 相互連結시킨후 全體系統의 安定度を 固有値를 구하여 判定한다. 그리고 Tie-line의 潮流 및 그것의 중요모드를 固有値 및 固有벡터로 부터 決定할 수 있다.

이 方法의 長點을 들면 다음과 같다.

가. 固有値 解析法을 사용하므로 收斂性이 좋다. 固有値 解析法을 大系統까지 擴張할 수 있다.

나. 各地域의 動的特性에 대한 具體的인 情報를 얻을 수 있다.

다. 地域間的 振動모드의 安定度を 改善할 수 있도록 系統安定器, HVDC制御 및 SVC(Static Var Compensator)등의 特殊 制御方案을 設計할 수 있다.

라. 어떤 地域을 低次로 줄인 후 다른 地域의 安定度 研究를 위한 等價모델로 사용할 수 있다.

마. 같은 프로그램으로 單·地域의 具體的인 固有値 解析 및 大系統의 地域間的 動的特性의 解析에 共用할 수 있다.

이 方法의 短點은 다음과 같다. 即, 大系統의 경우 標準 固有値 解析 프로그램을 사용할 수 있도록 全體系統을 數百個의 狀態變數로 表現할 수 있도록 次數를 줄어야 하며 따라서 計算量이 많은 것이다.

4. 檢討 및 要約

이상 살펴본 바와 같이 系統의 安定度 解析方法에는 時間領域-周波數領域 接近方法, 定態安定度-過渡安定度, 決定論의-確率論의 接近方法, Liapunov Direct Method를 利用한 直接的 等 또는 視覺에 따라 여러가지의 解析方法과 이에 相應하는 컴퓨터 프로그램이 開發되어 있다.

그러나 어떤 方法도 制限이 있어서 安定度 解析에 理想的인 것은 없다. 各 解析法은 長短이 있으므로 相互補完하는 役割을 한다고 볼 수 있다. 電力系統을 設計하고 運用하는데 必要한 廣範圍한 安定度 研究를 위해서는 各 解析方法의 限界點 및 長短을 把握하여야 計算結果를 올바르게 分析할 수 있다고 생각된다.

附言할 것은 電力系統의 安定度は 系統의 信賴度(Reliability)를 결정하는 많은 要因中의 하나에 不過하다는 것이다. 發電容量 및 送電線 容量을 充分히 擴張하여야 하고, 發電機, 繼電器 및 遮斷器等 機器 自體가 信賴性이 있어야 하며, 停電時나 系統의 部分的 또는 全體적으로 붕괴되었을 때 신속하고 無理없이 復旧可能하여야 하는 등의 諸般 要件등이 充足되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

- 1) C. Concordia, "Power System Stability", Proceedings of the International Symposium on Power System Stability, Ames, Iowa, 1985.
- 2) P. Kundur, "Evaluation of Methods for Studying Power System Stability", Proceedings of the International Symposium on Power System Stability, Ames, Iowa, 1985.
- 3) J. P. Barret, "Electric Power System Utilities and Stability," Proceedings of the International Symposium on Power System Stability, Ames, Iowa, 1985.
- 4) A. N. Michel, A. A. Fouad and V. Vittal, "Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 30, May 1983.