

大規模 電力系統의 構造問題와 研究事例

李 章 揆·朴 永 文
(서울大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 序言
- 2. 系統構造問題
- 3. 分割法에 의한 潮流計算

- 4. 結言
- 參考文獻

1 序 言

電力系統은 전력을 공급하는 發電所와 전력을 소비하는 負荷 그리고 發電所와 負荷를 연결하는 送電線路로 이루어진다.

現代電力系統은 小數의 發電所와 負荷끼리 그룹을 이루는 局地系統에서 벗어나 全發電所와 負荷를 한꺼번에 묶는 大規模 回路網을 構成한다. 우리나라의 경우 제주도를 제외한 全國이 한 回路網으로 이루어져 있어 系統內에 48개의 發電所와 181개의 負荷센타와 이들이 送電線路 378線으로 연결되어 있으며 美國의 경우에는 텍사스주를 제외한 本土內의 모든 지역이 함께 묶여 있어 총 發電量 530 Gigawatt가 넘는 거대한 계통을 이루고 있다.

이와 같이 電力系統이 大規模화해감에 따라 상당한 負荷變動에 대해서도 系統의 安定度를 유지할 수 있고 局地화된系統보다는 經濟運用을 할 수 있는 잇점이 있는 반면 系統의 계획수립이나 運用이 복잡해졌고 일단 事故가 發生하면 大型化하고 그것을 수습하는데 長時間이 걸릴 위험성을 갖게 된다. 1979년의 뉴욕 大停電事故가 그 代表的인 例로 간단한 送電線 短絡事故로 시작하여 연쇄적으로 넓은 지역에 확대되어 장시간의 정전사고를 가져온 것이다. 아직 大規模 電力系統의 完全한 制御方法이 개발되어 있지 않고 경험이 풍부한 오퍼레이타라도 수많은 경우

에 대비하기란 쉽지가 않아 大規模 電力系統에 대한 연구는 계속되어야 할 課題이다.

現代의 大規模 電力系統에 따른 문제를 다루기 위하여서는 다음과 같은 스템을 밟아야 할 것이다.

(1) 解決하여야 될 문제의 설정

電力系統 問題는 크게 나누어 系統확장과 계획수립에 따른 문제와 系統運轉에 따른 문제로 大別되며 後者は 다시 正常 狀態에서의 運轉 (Normal Operation), 正常狀態이나 不確實한 條件에서의 運轉 (Normal Operation under Uncertain Condition), 非正常狀態에서의 運轉 (Operation in Abnormal Condition) 등으로 나눌 수 있고 各運轉狀態內에서 다시 여러가지 문제로 갈라진다. 電力系統의 예상되는 수요에 따른 적절한 계획수립과 現存系統의 최적 운전과 안정운전을 위한 알맞는 문제의 정의와 설정이 우선적으로 필요하게 된다.

(2) 構造決定(Delineation of Problem Structure)

일단 문제가 설정되면 그것을 다룰 수 있는 크기로 縮小시키거나 (Approximation) 또는 分解하는 (Decomposition) 過程을 거쳐 문제의 구조를 결정하여야 한다. 前者보다는 後者が 問題를 原型대로 유지할 수 있는 장점을 갖게 되고 따라서 연구도 그쪽에 많이 치우쳐 있어 여기에서도 後者만을 論하기로 한다. 分解된 구조는 계층형태 (Hierarchical)를 가질 수도 있고 동등한 수준의 썬브시스템들이 單層

構造를 이루어 서로 情報 (Information) 를 주고받을 수도 있다.

(3) 解析方法의 개발

分解된 문제 구조에 적합한 해석방법을 개발하여 大規模 디멘존을 갖는 原問題 대신 쪼개진 각각의 작은 문제를 풀어 그것을 합치므로 문제를 해결해 나간다. 이때 分解된 썬브시스템 사이의 相互關係를 어떻게 처리할 것인가 결정하는 것이 중요한 문제로 대두된다.

(4) 적용

이와 같이 개발된 해석방법을 실제의 大規模 電力系統에 적용하는 것이 최종단계가 될 것이다. 이때 파생하는 정보교환문제 (Information Flow Between Subsystems), 계산속도문제, 각 썬브시스템의 데이터 관리문제등을 해결한다.

大規模 電力系統의 문제를 해결해 나가는데 있어 위에 열거한 단계는 같은 比重을 갖는 것들로서 실제 문제에 부닥쳤을때 어느 것이든 해결되어야 하는 것들이나 지금까지 大規模 시스템에 대한 이론 연구는 주로 단계(3)에 집중되어 있고 그동안 이 분야의 연구는 상당히 활발하여 전문논문지 또는 전문단체의 특징으로도 몇번 발표된 형편이고^{1)~3)} 개별적으로 발표된 연구논문의 수도 상당수에 달하여 그동안 발표된 조사논문 (Survey Papers)^{6)~7)} 에 잘 소개되어 있다. 전력계통과 관련하여 이 분야의 연구활동은 美國에너지省 (Department of Energy) 에서 주관하여 大規模 시스템 이론 개발 및 연구를 중용하여 왔다.⁴⁾ 이러한 노력과 대규모 시스템에 대한 활발한 연구에도 불구하고 그 결과는 아직도 빈약한 편이어서 뚜렷한 방향제시나 이론으로서의 체계가 서 있지 못한 형편이다. 이 논문에서는 위에 열거한 小課題들중 그동안 비교적 자세히 다루어지지 않았던 (2)번 大規模 시스템 構造問題에 대하여 소개하고 大規模 電力系統의 潮流計算을 分解方法으로 계산한 實例를 들어 大規模 시스템 문제의 특징과 求解를 구하는데 따른 문제점들을 살펴보고자 한다.

② 系統構造問題

電力系統의 動的 또는 靜的 問題를 다루기 위해 그 구조를 나타내기 위하여 그래프 (Graph) 를 사용하면 편리하다. 그래프는 節 (Node) 과 支路 (Branch) 로 이루어지며 식으로 표시하면

$$G = (V, R)$$

여기서 V 는 節 (Node) 의 집합 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 이고, R 은 支路 (Branch) 의 집합 $\{r_1, r_2, \dots, r_l\}$ 을 나타낸다. 節 v_i 와 v_j 를 잇는 支路 r_k 는

$$r_k = (v_i, v_j)$$

로도 나타내며 節 v_i 와 루프 (Loop) 를 이루는 支路 r_l 은

$$r_l = (v_i, v_i)$$

로 나타낼 수 있다.

電力系統의 주어진 문제에 따라 다르지만 일반적으로 상태방정식과 대수방정식을 써서 系統問題의 수학적 모델을 세우게 되며 식에 쓰인 입출력 또는 상태변수등을 節로 나타내고 함수관계 (Functional Relationship) 를 支路로 表示하면 문제의 구조를 그래프로 나타낼 수 있다. 이러한 技法은 Siljak의 著書⁸⁾에 잘 정리되어 있으며 理解를 돕기 위해 참고문헌에 소개된 간단한 예를 한가지 들어 보기로 한다. 動的 시스템이 아래와 같은 방정식으로 표시될 때

$$\dot{x}_1 = f_1(x_2, x_4)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2)$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_4, u)$$

$$\dot{x}_4 = f_4(x_3, x_4)$$

와

$$y = g(x_1)$$

이에 해당되는 그래프가 그림 1에 그려져 있다. 네 개의 상태변수와 한개씩의 입력, 출력 변수가 節로 표시되고 변수사이의 함수관계가 支路로써 표시되어 있다. 支路의 方向은 함수의 종속관계에 의하여 결정되며 그림에서 상태변수 x_1 은 상태변수 x_2 와 x_4 에 종속되어 있으므로 支路는 x_2 에서 x_1 , x_4 에서 x_1 으로 각각 향하게 된다.

시스템이 일단 그래프 구조로 나타내지면 시스템의 여러가지 구조적 특성을 고찰해 볼 수 있다. 到達可

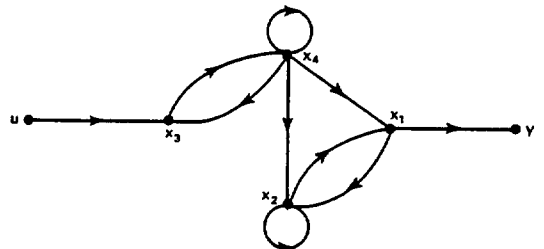


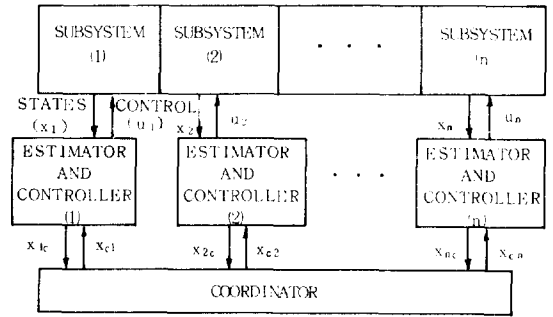
그림 1. 動的 시스템의 그래프 構造

能性 (Reachability), 구조적 可視測性 (Structural Observability), 구조적 可制御性 (Structural Controllability), 脆弱性 (Vulnerability) 등이 그 대표적인 것들로서 이것들은 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 상태변수는 추정하거나 제어하기 위해서는 우선 구조적으로 觀測이나 制御가 可能하여야 하기 때문이다. 간단한 시스템에서는 이러한 성질들을 따져보는 것이 그리 어렵지 않으나 大規模 시스템의 경우 이것은 쉬운 문제가 아니다. 위에 열거한 구조 解析方法들을 정의하고 지금까지의 연구결과를 살펴보도록 하자.

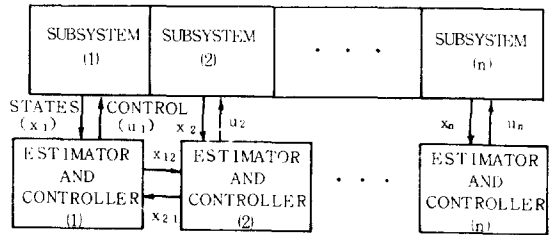
다이나믹 시스템의 모든 상태변수가 한개 이상의 입력변수와 연결이 되어 있을때 그 시스템은 입력으로부터 到達可能 (Input Reachable) 하다고 말하고 모든 상태변수가 한개 이상의 출력변수에 영향을 미칠 수 있을때 그 시스템은 출력으로 到達可能 (Output Reachable) 하다고 말한다. 到達可能性을 결정하기 위하여는 그래프의 경로 (Path) 를 찾는 문제로 귀착이 되는데 참고문헌⁸⁾에서 經路行列 (Path Matrix) 을 이용하여 결정하는 方法을 제시하였고 그밖에 불리안 대수 (Boolean Algebra) 를 이용하는 方法⁹⁾, 탐색 方法에 의한 것¹⁰⁾ 등이 소개되었고 참고 문헌¹¹⁾ 에 여타의 알고리즘들을 조사수록하였다.

構造的 可制御性 (Structural Controllability) 은 처음 Lin¹²⁾에 의하여 정의된 것으로 구조적으로 다이나믹 시스템을 변경시키지 않고 시스템의 제어가 항상 가능한 시스템 파라메타값이 존재할 때 구조적으로 制御가 可能하다고 말한다. 참고문헌¹²⁾에서 單入力 線型시스템에 대한 構造的 可制御性의 必要, 充分條件을 제시하였고 이에 대한 연구는 Shields와 Pearson¹³⁾, Lin¹⁴⁾, 그리고 Mayeda와 Yamada¹⁵⁾에 의하여 확장되었다. 構造的 可觀測性 (Structural Observability) 은 可制御성과 雙對性 (Duality) 을 지니는 것으로 그 條件이나 연구가 並行으로 이루어지고 있다. 시스템이 구조적으로 制御가 可能하기 위해서는 우선 入力으로부터 到達可能하여야 하고 觀測이 可能하기 위해서는 出力으로 到達可能하여야 한다. 다음 시스템이 制御가 可能하기 (Controllable) 위하여서는 먼저 構造的으로 制御가 可能하여야 하고 觀測이 可能하기 (Observable) 위하여서는 構造的 可觀測性을 가져야 한다. 따라서 大規模 시스템의 狀態推定이나 制御가 可能한지 알아보는 것이 先決되어야 할 것이다.

脆弱性 (Vulnerability) 은 電力系統 構造上 重要한 性質로서 그래프에서 어떤 節이나 支路를 제거하였을때 入力 또는 出力과의 到達性 (Reachability)을 잃



(a) 中央統制方式



(b) 分散統制方式

그림 2. 分割된 構造

어버리면 그 系統을 脆弱하다고 말한다. 電力系統에서는 事故에 의하여 또는 補修를 위하여 구조상의 변화를 갖게되고 이때 系統의 制御가 可能한지의 여부는 重要한 問題가 된다. 脆弱性에 대한 연구는 Siljak¹⁶⁾에 의하여 시작되었고 아직 活潑한 研究는 되고 있지 않는 형편이나 大規模 시스템 構造上 解決되어야 할 課題이다.

이미 언급한 것과 같이 大規模 動的시스템을 解析하기 위하여서는 그것을 다룰 수 있는 分割構造를 찾아야 할 것이다. 原 시스템 그래프를 分割하는데는 分割된 構造가 可觀測性이나 可制御性을 유지하는가 확인을 해보아야 한다. 그렇지 않으면 그 시스템의 狀態推定이나 制御를 論할 수 없기 때문이다. 일반적으로 動的시스템의 分割構造를 形成하는데는 그림 2에 보인 것과 같이 分割된 각각의 서브시스템을 中央統制方式 (Centrally Coordinated) 을 택하거나 分散統制方式 (Locally Coordinated) 을 택한다. 이때 해결되어야 하는 問題點들은

(1) 주어진 시스템을 어떻게 分割하므로써 願하는 構造를 얻을 것인가?

(2) 分割된 구조는 到達可能性, 可觀測性, 可制御性등을 만족하는가?

이러한 問題點들은 아직도 未解決된 課題들로서 계속 연구되어야 하는 것이다.

③ 分割法에 의한潮流計算

電力系統에서 가장 빈번히 다루는 문제가 潮流計算 (Load Flow) 으로 이 章에서는 大規模 電力系統에서 分割法에 의해 그것을 計算하는 過程을 설명함으로써 大規模 系統을 分割法에 의해 解析할 때 야기되는 問題點들 그리고 그 利點을 알아보고자 한다.

潮流計算이란 發電所와 負荷센타들의 母線을 節로 표시하고 그것들을 잇는 送電線路를 支路로 표시하는 電力系統 回路網에서 母線의 電壓과 送電線路의 電流를 計算하는 것으로서 이것은 수학적으로 非線型 연립방정식을 푸는 문제로 귀착되며 現在 Newton-Raphson 方法을 써서 數值的 解法을 이용하는 것이 가장 보편적인 方法이다. 潮流計算은 대형컴퓨터를 써서 상당히 大規模 電力系統까지도 별 문제없이 풀고 있으나 그것을 實時間制御들을 목적으로 사용하기 위해서는 빠른 계산속도를 요구하므로 分割法에 의한 方法이 연구되어 왔다.⁷⁾

分割法에 의한 潮流計算은 大規模 電力系統을 몇 개의 小回路網으로 나누어 각각의 潮流計算을 한 뒤 通合하여 願하는 解를 얻는 것으로 다음과 같은 문제점들을 해결해 주어야 한다.

- (1) 주어진 大規模 系統網을 어떻게 分割할 것인가?
- (2) 分割된 각 小回路網의 潮流計算을 위해 어떤 方法을 택할 것인가?
- (3) 각 小回路網사이의 相互依存性 (Interdependency) 을 어떻게 보상해 줄 것인가?
- (4) 각 小回路網에서 얻어진 答으로부터 전체 解를 어떻게 얻을 것인가?

위에 제시한 첫번째 문제는 最適 回路網 分割法⁸⁾을 이용하여 전력계통의 回路網을 적절한 크기의 小回路網으로 나누었으며 이때 小回路網사이의 接節 (Cut-Node)의 數가 最小가 되도록 하였다. 일단 分割된 후에는 改造된 (Modified) Newton-Raphson 알고리즘을 각 小回路網에 적용함으로써 全系統을 다루는 것보다 훨씬 적은 크기의 Jacobian 行列을 구하여 解를 구해 나가게 된다. 위에 열거한 문제들중 역시 가장 중요한 항목은 세번째로 그것들을 해결하기 위해 接節마다 一定電壓을 가진 가상적인 電源 (Auxiliary Voltage Source)을 연결하여 그 電源으로 하여금 연결된 이웃 서브시스템과의 電流흐름

표 1. 分割된 텍사스 電力系統

소회로망 번호	모선 수	송전선로수	변압기수	발전소수
1	164	181	36	10
2	208	272	45	26
3	192	259	57	19
4	172	211	42	9
5	158	187	54	17

표 2. 分割方法을 쓰지 않은 潮流計算

Number of Iterations	Total Absolute Power Mismatch of P (MW)	Total Absolute Power Mismatch of Q (MVAR)	Solution Time (Seconds)
3	4.272	274.227	707.59
4	0.325	77.086	939.87
5	0.016	63.089	1148.04
6	0.016	58.533	1392.41

표 3. 分割方法을 쓴 潮流計算

Number of Iterations	Total Absolute Power Mismatch of P (MW)	Total Absolute Power Mismatch of Q (MVAR)	Solution Time (Seconds)
3	11.275	144.902	100.08
4	5.305	28.378	137.08
5	2.087	7.603	171.62
6	1.817	5.591	205.07

(Power Flow)을 보상하도록 하는 식을 개발하였다.

이와 같은 分割法에 의한 潮流計算方式을 766개의 母線과 1014개의 送電線路, 229개의 變壓기 (이중 50개는 자동탭 변환 變壓기), 그리고 77개의 發電所를 갖고 있는 美國 텍사스 電力系統에 적용하여 分割하지 않고 얻은 結果와 비교하여 보았다. 우선 電力系統을 最適回路網 分割法에 의하여 아래 표1과 같이 5개의 小回路網으로 나누었으며 표2에 分割하지 않고 얻은 潮流計算 結果, 그리고 표3에 分割에 의하여 얻은 結果를 수록하였다. 그 값들은 PDP 10 컴퓨터를 사용하여 얻은 것들이며 이 結果로 보면 分割方式에 의하여 수렴속도가 빨라졌고 計算時間은 約 10배정도 短縮되었음을 알 수 있다.

4 結 言

現代 電力系統이 大規模化 했음에도 그것을 다룰 수 있는 大規模 시스템 이론의 뒷 받침이 없기 때문에 潮流計算을 포함한 극히 소수의 靜的問題 몇 가지를 제외하고는 大規模 電力系統의 精確한 解析이 불가능한 실정이다. 系統의 大規模化에 따라 문제의 구성, 시스템의 구조에 대한 연구로부터 시작하여 系統을 分割하여 적절히 풀어나갈 수 있는 연구가 계속되어야 할 것이다. 여기서 電力系統의 모든 문제에 적용할 수 있는 단일 방법을 기대 할 수는 없고 문제마다 그에 맞는 方法이 개발 되어져야 할 것이다. 大規模 電力系統과 관련된 연구과제 몇 가지를 나열해 보면

- 大規模 電力系統을 다룰 수 있는 적절한 數式 構造 決定問題

- 大規模 시스템의 分割方式에 대한 問題

- 分割된 시스템에 적용할 수 있는 推定理論, 制御理論, 數理計劃法등의 개발문제

이러한 問題들은 광범위한 문제영역을 포괄적으로 서술한 것이며 大規模 電力系統의 問題는 몇 가지 靜的問題를 제외하고는 問題의 構成 (Formulation) 부터 적절한 解析方法이 전혀 개발되지 않은 狀態로 많은 興味있는 研究課題들이 산적해 있는 形便이다.

參 考 文 獻

- 1) Athans, M. (Editor); "Special issue on large-scale systems and decentralized control," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-23, No. 2, April 1978, pp. 105-371.
- 2) Ho, Y. C., Mitter, S. K., (Eds.); "Directions in large-scale systems," Plenum Press, New York, 1976.
- 3) Guardalassi, G., Locatelli, A., (Eds.); "Large-scale systems theory and applications," Proc. IFAC Symposium, June 1976, Udine, Italy.
- 4) Fink, L. H., Trygar, T. A., (Eds.); Systems engineering for power: organizational forms for large scale systems, Proc. Engineering Foundation Conf., October 1979, Davos, Switzerland.
- 5) Sandell, N. R., Varaiya, P., Athans, M.,

- Safanov, M. G.; "Survey of decentralized control methods for large-scale systems," IEEE Trans. Automatic Control, AC--23 (1978), pp. 108--128.
- 6) Javdan, M. R. and Richards, R. J.; "Decentralized control systems theory: a critical evaluation," International Journal of Control, Vol. 26, No. 1, 1977, pp. 129--144.
- 7) Athans, M.; "Advances and open problems on the control of large-scale systems," Proc. IFAC Congress, Helsinki, 1978, pp. 2371--2382.
- 8) Siljak, D. D.; "Large-scale dynamic systems stability and structure," Elsevier North-Holland, Inc., New York, 1978.
- 9) Warshall, S., "A theorem on boolean matrices," Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 9, 1962, pp. 11--12.
- 10) Tarjan, R. E.; "Depth-first search and linear graph algorithm," SIAM Journal of Computing, Vol. 1, 1972, pp. 146-160. Vol. 1,
- 11) Bowie, W. S.; "Applications of graph theory in Computersystems," International Journal of Computer and Information Sciences, Vol. 5, 1976, pp. 9--31.
- 12) Lin, C. T.; "Structural controllability," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC--19, No. 3, 1974, pp. 201--208.
- 13) Shields, R. W. and Pearson, J. B.; "Structural controllability of multi-input linear Systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC--21, No. 1976, pp. 203 -- 212.
- 14) Lin, C. T.; "Systems structure and minimal structure controllability," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC--27, No. 5, 1977, pp. 855--862.
- 15) Mayeda, H. and Yamada, T.; "Strong structural controllability," SIAM Journal of Control and Optimization, Vol. 17, No. 1, 1979, pp. 123--138.
- 16) Siljak, D. D.; "Vulnerability of dynamic systems," Proceedings of IFAC Workshop on Control and Management of Integrated Industrial Complexes, Toulouse, France, 1977.

- pp. 133—144.
- 17) Lee, J. G., Vogt, W. G., and Mickle, M. H.;
“Optimal network decomposition and load
flow analyses for large-scale power systems,”
Proceedings of IEEE Winter Power Meet-
ing, Paper No. A-78058-0, New York,
1978.
- 18) Lee, J. G., Vogt, W. G., and Mickle, M. H.;
“Optimal Decomposition of large-scale net-
works,” IEEE Transaction on Systems, Man,
and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 7, July
1979, pp. 369—375.