

過渡現象 分析用 Program인 EMTP에 관한 紹介

李 斗 鉉*·吳 英 秀**·鄭 泰 豪***

차 례

- 1. 머릿말
- 2. EMTP開發 및 使用現況
- 3. EMTP의 機能
- 4. EMTP의 基本 理論
- 5. 韓電의 EMTP의 適用實例
- 6. 맺는말

1. 머릿말

電力系統은 大部分의 時間을 正常狀態下에서 運轉되고 있으나 豫想되는 最大의 外力에 견딜 수 있도록 設計되어야 한다. 이러한 外力 (stress) 들은 통상 系統의 過渡現象 期間中에 惹起되므로 電力系統의 設計는 正常條件보다 過渡條件에 依해 結定되어진다는 것은 周知의 事實이다. 送電線路의 鐵塔의 크기 送電導體의 離隔距離, 機器捲線의 絶緣, 遮斷器의 定格, 機器의 負荷容量等의 事項들은 電力系統의 過渡狀態를 考慮하여야 하기 때문에 電力系統의 過渡現象에 對한 올바른 理解가 必要하다 하겠다. 그러나 過渡現象은 單一 周波數 領域에서 發生되는 것이 아니므로 正常狀態의 分析에 活用되는 페이저 (Phasor) 로써 現象을 分析할 수 없고 大部分 聯立微分方程式을 풀어야 하므로 多數의 絶點과 支路를 가지는 系統에서는 計算이 複雜하여 手計算에 依한 結果를 얻는다는 것은 거의 不可能한 境遇가 많다. 그러므로 1920年代부터는 TNA (Transient Network Analyzer) 를 使用하여 過渡現象을 分析하기 시작했고 오늘날에도 널리 使用되는 道具中의 하나이다. TNA는 實際

系統을 構成하고 있는 要素들을 一定한 比率로 縮小하여 回路를 連結하므로 計算結果에서 不安定한 解를 超來치 않고 使用者들이 實現象에 가까운 結果를 보게 되므로 理解가 빠르다는 長點을 가진 反面에 系統 增大에 對應하는 融通性이 缺如되어 있고 回路構成에 長時間이 所要될 뿐 아니라 經濟的 負擔이 크다는 短點 때문에 오늘날에는 既存 TNA가 없는 使用者들은 過渡現象 分析用으로 主로 數理計算機 (Digital Computer) 를 利用하고 있으며 TNA 使用者까지도 컴퓨터를 利用하는 傾向이 뚜드러진 趣勢라 하겠다. 電力系統의 過渡現象 分析用으로 開發되어 널리 使用되고 있는 數理計算用 프로그램으로 EMTP를 비롯하여 METAP, TRANSO, ECAP, CSMP 등이 있으나 韓電에서는 1980年 6月부터 EMTP를 使用하여 왔고 그 간의 經驗에 비추어 본 프로그램의 優秀한 成能을 알 수 있었으므로 여기에 EMTP에 關한 簡略한 紹介를 하기로 한다.

2. EMTP 開發 및 使用現況

EMTP (Electromagnetic Transient Program의 머릿글자) 란 電力系統의 過渡現象을 分析하는 數理計算機用 프로그램으로서 美國의 BPA (Bonneville Power Administration) 에 依하여 開發되었다. BPA의 公開主義 原則에 따라 프로그램이 無料로 公

* 正會員 : 韓國電力公社 送變電 部長
 ** 正會員 : 韓國電力公社 送變電部 技術課長
 *** 正會員 : 韓國電力公社 送變電部 技術課長 代理

開되었기 때문에 現在에는 大學, 研究所, 電力會社, 製作會社 등을 包含하여 世界的으로 200個 以上の 使用者를 가지게 되었고 20個 以上の 서로 다른 컴퓨터 機種에 使用되고 있는 데 이 中 確認된 使用者와 컴퓨터 機種을 要約하면 表 1과 같다. E M T P 는 當初 Dr H.W.Dommel 에 의하여 開發되었으나 1973年 그가 BPA에서 캐나다의 British Columbia 大學으로 옮겨 간 뒤 Dr .W.S Meyer가 그 開發 責

任을 引繼받아 機能을 擴張하여 왔다. E M T P 의 當初 目的은 電力系統의 非-지 現象만을 分析하기 爲함 이었으나 그 後 同期發電機, 다이리스타, 制御系, 回轉機 등의 모델이 追加되고 터빈 發電機의 SSR (Subsynchronous Resonance) 과 交流-直統 交換 回路의 解析, 高調波 解析까지 할 수 있는 機能이 補強되어 凡用성이 풍부한 프로그램이 되었다. 그림 1 에 E M T P 의 段階的 擴張 內譯을 圖示하였다. E M

表 1. 世界的 E M T P 使用者 및 利用計算機

國 名	使 用 者	組 織	計算機種類
美 國	American Electric Power (A E P)	電力會社	I B M
	Basin Electric	"	Honeywell ₁₎
	Bonneville Power Administration (B P A)	電力廳	VAX 11/780
	EBASCO	計算會社	Burroughs
	General Electric (G E)	製作會社	MARK - II
	Lawrence Livermore Laboratory	研究所	CRAY - 1
	Minnesota Power & Light (M P & L)	電力會社	Prime
	Modular Computer Systems	計算會社	MODCOMP
	University of Minnesota	大 學	C D C
	" Pittsburgh	"	PDP - 10
" Wisconsin	"	Harris	
카 나 다	Ontario Hydro	電力廳	UNIVAC
	Hydro Quebec	"	S E L
브 라 질*	FURNAS	"	I B M
日 本 2)	中部電力	電力會社	UNIVAC
	電力中央 研究所	研究所	FACOM
	三 菱	製作會社	VAX
	日 新	"	ACOS (I B M ?)
	東 芝	"	C D C
	明電社	"	ACOS
	日 立	"	HITAC
	西 獨	AEG - Telefunken	"
벨 기 에	FGH	研究所	Siemens
	LABORELEC	"	S E L
프 랑 스	Katholie ke Universiteit Leuven	大 學	I B M ?
	EDF	電力廳	MODCOMP
이 탈 리 아	CESI	研究所	I B M ?
포르 투갈	Electricidade de Portugal	電力廳	UNIVAC
스 웨 덴	The Swedish State Power Board	-	MODCOMP ?
호 주	Electricity Commission of N. S. W .	-	-
中 共	北京大學	大 學	MODCOMP
	T P C	電力會社	Prime ?
대 한 민 국	韓國電力	電力公社	FACOM

註 * : E M T P 使用者 Group 이 形成된 나라

1) : BPA에서는 最近 Microcomputer 인 Appollo 에 E M T P 를 설치하는 작업을 하고 있음

2) : 일본의 E M T P 使用者 Group 은 6個 大學을 엮쳐버로, 4個 電力會社를 包含하여 25個의 會員을 가지고 있음.

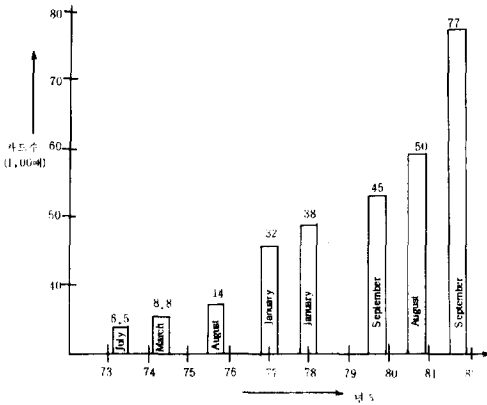


그림 1. EMTP의 段階의 擴張內譯

TP가 그 간의 量的 質的 擴張과 더불어 多數의 使用者를 가지게 된 이면에는 Dr. S. Meyer 및 그의 同助者들이 考案한 editor/translator의 出現에 依한 것이라 하겠다. 이러한 自動翻譯機가 없을 때에는 BPA가 使用하는 機種과 다른 컴퓨터에 EMTP를 設置하기 위하여는 별도의 變換 作業을 手作業으로 해야만 하였으므로 變換에 所要되는 時間과 努力이 至大하였음을 쉽게 짐작할 수 있을 것이다. 그러나 지금은 그림 2에 例示한 바와 같이 凡用的 TP 프로그램 파일을 自動翻譯機를 利用하여 願하는 機種의 Fortran source 프로그램을 얻을 수 있기 때문에 대단히 便利하게 되었다. EMTP의 使用者數가 늘어감에 따라 Source 프로그램을 일일이 BPA가 最終 使用者에게 보내지 않고 機種別로 中間 配分者를 選定하여 그들로 하여금 동일 種類의 使用者들에게 要請時 配分해 주도록 하고 있다. 韓電은 1980年初 美國 Wisconsin大學의 協助하에 GPU로 부터

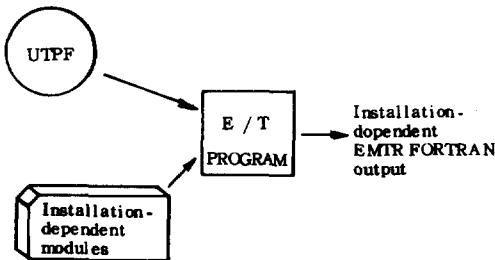


그림 2. EMTP 自動翻譯過程

IBM version 을 入手하여 FACOM 컴퓨터에 設置 活用해 왔으며 1982年 11月 BPA의 Dr. W. S. Meyer 를 招請하여 세미나를 開催하였다.

이 期間中 Meyer 박사과 最近版 EMTP 入手問題를 協議한 結果 現在 試驗 使用을 막 끝내고 使用者들에 配分되고 있는 "M32" IBM Version 을 供給받기로 되었다. 이렇게 되면 現在 使用中인 EMTP로는 分析할 수 없었던 ZnO 피뢰기의 모델, 高調波 分析等이 可能하게 되어 EMTP의 活用 範圍를 倍加시킬 수 있을 것으로 期待된다.

3. EMTP의 機能 ("M 32" 基準)

EMTP는 單相 및 多相回路에서 正常狀態는 勿論 過渡狀態에 있어서의 電壓, 電流, 電力, 에너지 등을 入力하는 사람의 指令에 따라 計算할 수 있는 데 이中 EMTP로 解析 可能한 代表的인 分野를 例示하면 表 2와 같다. 表 2中 特히 開閉 せ-지 過電壓 및 T

表 2. EMTP로 分析可能한 分野

分析對象分野	主要關聯機器	備 考
雷 せ-지 過電壓	送電線, 變電所母線	絕緣 level 決定
開閉 せ-지 TRV 計算	"	"
交流-一直流 連素系統	遮斷器	遮斷器定格決定
故障 計算	變換裝置	Thyristor 包含
SSR 自己勵磁	送電線, 變電所母線	機器 定格 決定
鐵 共 振	發電機, 勵磁機, 調速機, 터빈	
制御回路	變 壓 器	
風力發電	各 種	TACS 使用
短時 過電壓	誘導發電機, 인버터	
	變壓器, L A	

RV (Transient Recovery Voltage)의 計算에는 開閉時間에 따라 過渡電壓이 ผัน이하게 달라지므로 同一한 現象에 對하여도 多數의 計算을 反復하여야만 必要한 結論을 얻을 수 있는데 EMTP에서는 Monte Carlo 方法을 導入하여 計算 回數 및 平均 開閉時間 (Tmean), 標準偏差 (δ), 등을 指定해 주면 開閉時間을 $Tmean \pm 4\delta$ 사이에서 任意로 變化시켜 計算을 行할 수 있으며 그 結果에 對한 頻度曲線을 Printer-plot 하고 있어 便利하다. 讀者들의 理解를 돕기 爲하여 EMTP의 模擬可能한 回路 要素를 좀 더 具體的으로 整理하면 表 3과 같다. 表 3에 言

表 3 . EMTP 에 包含된 模擬要素

要 所	Model	備 考
送 電 線	<ul style="list-style-type: none"> ◦ R - L - C 集中定數 回路 ◦ π " " ◦ 分布 定數 回路 ◦ 周波數 依存 回路 	<ul style="list-style-type: none"> ← 燃架된 對稱 線路 ← 非燃架된 非對稱 線路 ← 相互 結合, 非結合 線路 ← Modal form
負 荷	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 線 形 R - L - C ◦ 非線形 R ◦ " L ◦ 時變 R 	<ul style="list-style-type: none"> ← L A . ← Hysteresis 特性
變 壓 器	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 單相 變壓器 ◦ 3相 3 腳 鐵心 變壓器 	勵磁特性
L A	<ul style="list-style-type: none"> ◦ SiC ◦ ZnO 	
電 源	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 定電壓源, 定電流源 ◦ 任意波形的 電源 ◦ TACS 制御電源 ◦ AC / DC 變換器 模擬電源 ◦ 同期發電機 	<ul style="list-style-type: none"> ← AC, DC TACS : Transient Analysis of Control Systems 의 약어
回 轉 機	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 同期機 ◦ 誘導機 ◦ 直流機 	
스 위 치	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Flashover SW ◦ 時間制御 SW ◦ TACS 制御 SW ◦ Monte Carlo SW 	
整 流 素 子	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Diode ◦ Thyristor valve ◦ Triac 	
制 御 系 (TACS)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 積分器, 加算器, 論理回路 	Analogue Computer 와 同一機能

及된 模擬 要素들의 入力 Data 를 作成하기 爲하여는 送電線路的 整數計算, 變壓器의 等價回路, 飽和特性 等の 基礎計算이 必要하게 된다. 이와 같은 基礎計算을 爲하여 EMTP 에는 多數의 補助 루틴들이 包含되어 있어 特定한 keyword 를 줌으로써 利用이 가능한 데 이들에 對하여 項目別로 簡單히 說明하면 다음과 같다.

(1) "Ling Constants "

架空 送電線路的 線路整數를 計算하는 Routine 으로서 鐵塔의 模型圖, 導體의 配置 및 크기, 抵抗率,

大地의 固有抵抗等을 入力하면 π 型 集中整數行列과 零相, 正相, 逆相分の 直列 임피던스와 分路 어드미턴스 行列이 分布整數行列과 함께 出力된다.

(2) "Cable Constants "

케이블의 内部 構造, 抵抗率, 透磁率等을 入力하여 π 型 集中整數行列, 分布整數行列 및 Modal 變換行列等을 "Line Constants " 와 類似한 모양으로 出力하는 데 이 Routine 으으로써 架空送電線의 整數 計算도 可能하다.

(3) "Xformer "

變壓器의 定格電壓, 定格容量, 短絡임피던스 等에서 相互 結合을 考慮한 R - L 分岐로서의 行列要素를 求하는 Routine 이다.

(4) "Saturation "

無負荷 變壓器 또는 Reactor 의 V - I 特性으로 부터 $\Phi - I$ 特性을 計算하며 또한 Hysteresis 의 特性을 出力한다.

(5) "Weighting "

完全 摺架된 線路에서 大地를 歸路로 하는 Mode 의 周波數 依存 效果를 入力 시키기 위한 데이터를 出力하는 Routine 이다.

(6) "Semlyen Setup " "Ametani Setup "

架空 및 케이블 線路整數들의 周波數依存 效果를 考慮한 入力데이터를 作成하기 爲한 資料를 計算하는 Routine 으로서 모든 Mode 에 對하여 周波數 依存 效果를 計算하며 線路의 對稱, 非對稱에 關係가 없다. 이 들 Routine 의 理論的 背景은 非正弦波 함수를 Fourier 變換하여 周波數 領域에서의 spectrum 을 求한 다음 상승적분 (Convolution) 理論을 適用하여 微少變化에 對한 應答을 計算한 後 逆 Fourier 變換을 通하여 時間 領域으로 置換하는 것이다.

(7) "Marti Setup " "Hauer Setup "

上記 (6) 項의 周波數 依存 效果를 計算하는 Routine 의 短點을 補完한 Routine 이다.

以上 說明한 機能 이외에도 EMTP 의 出力에는 絶點電壓, 支路電流, 電力, 에너지等的 最大值와 最大値가 發生되는 時間等을 包含시킬 수 있으며 數値로 出力된 量은 別途 指令에 依하여 프린터 plot 이나 Pen - plot 할 수 있다. 또한 EMTP 使用中 Error 가 發生時에는 豫想되는 Error 의 原因을 詳細하게 메세지로 出力시켜 줌으로써 使用者가 데이터 에러를 迅速히 修正할 수 있도록 되어 있는 것도 便利한 機能의 하나라 하겠다.

4. EMTP 의 基本 理論

電力系統의 過渡現象을 EMTP 로 分析할 境遇, 連續的인 解를 求하는 것이 아니라 一定한 時間區間(Δt) 마다의 不連續 計算을 정해준 時間 (T) 동안 反

復해 간다. 이 때 컴퓨터가 計算을 수행하여야 할 回數는 $\frac{T}{\Delta t}$ 이므로 Δt 를 너무 작게 잡으면 컴퓨터 使用時間이 길어지고 反對로 Δt 를 너무 크게 잡으면 計算 速度는 빨라지나 誤差가 커진다. 그러므로 Δt 의 指定에는 各별히 有意를 하여야 하는 데 一般的으로 開閉 せ - 지의 計算이나 故障 計算等에는 msec . 單位로, 雷 せ - 지 計算에는 μ sec 單位가 使用된다. 前述한 바와 같이 過渡現象의 解析에는 聯立 微分方程式을 利用하여 電壓, 電流間의 관계式을 樹立하게 되는 데 數理計算機는 微分方程式을 直接 計算하는 것이 아니라 高速 計算을 爲하여 이 들을 代數方程式으로 바꾸어 計算하게 된다. 그러므로 微分方程式을 適切한 代數方程式으로 置換시킬 等價回路의 構成이 必要하다.

(1) 抵抗回路

그림 3 과 같은 抵抗回路에서 어느 時間 t 에 있어서의 絶點電壓과 支路電流의 關係式을 세우면 ①式과 같다.

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{R} \{ e_k(t) - e_m(t) \} \quad \text{①}$$

그러므로 抵抗回路는 別度の 等價回路가 必要치 않다.

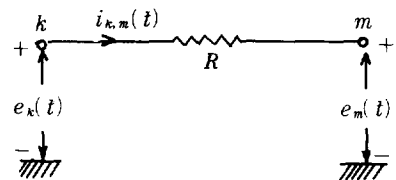


그림 3. 抵抗 回路

(2) 인덕턴스 回路

그림 4 - a 와 같이 絶點 k, m 사이에 인덕턴스 L 이 連結되어 있을 境遇

$$e_k - e_m = L \frac{di_{k,m}}{dt} \quad \text{2a}$$

이므로

$$i_{k,m} = \int_{t-\Delta t}^t \frac{1}{L} (e_k - e_m) dt + i_{k,m}(t - \Delta t) \quad \text{2b}$$

이 되는 데 여기에 그림 4 - b 와 같이 사다리꼴 적분법칙 (trapezidal integration rule) 을 적용하면 式 2c 와 같이 된다.

$$i_{k,m}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{ e_k(t) - e_m(t) + e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \} + i_{k,m}(t-\Delta t)$$

$$= \frac{\Delta t}{2L} \{ e_k(t) - e_m(t) \} + I(t-\Delta t) \quad 2c$$

여기서 $I(t-\Delta t) = i_{k,m}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \}$

$e_m(t-\Delta t)$ 를 過去 이력 (past history) 라 한다. 以上の 結果를 等價回路로 表示하면 그림 4-c와 같은데 이때 誤差의 범위는 대략 $(\Delta t)^3$ 에 比例한다.

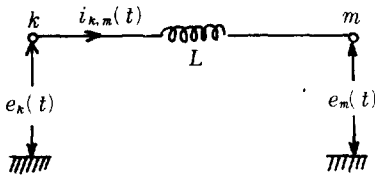
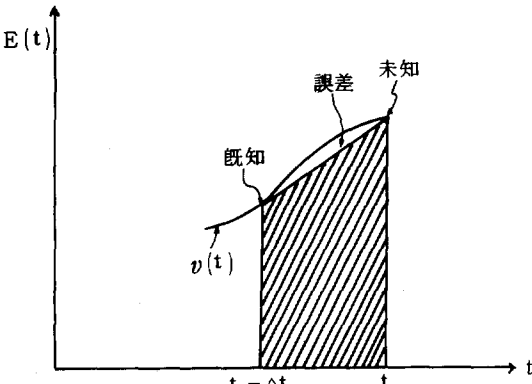


그림 4-a. 인덕턴스 회로



$$\int_{t-\Delta t}^t v(t) dt = \frac{\Delta t}{2} \{ v(t) + v(t-\Delta t) \}$$

그림 4-b. Trapezoidal Integration

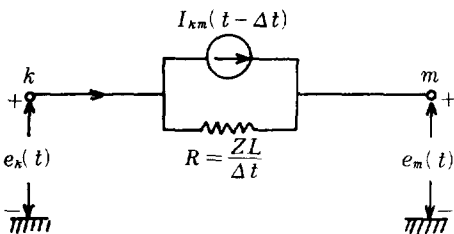


그림 4-c. 인덕턴스 회로의 등가회로

(3) 커패시턴스 회로

그림 5-a와 같이 絶點 k, m 사이에 커패시턴스 c가 連結되어 있을 境遇 인덕턴스와의 雙對性을 適用하면

$$e_k(t) - e_m(t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_{k,m}(t) dt + e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \quad 3a$$

$$= \frac{\Delta t}{2C} \{ i_{k,m}(t) + i_{k,m}(t-\Delta t) \} + e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \quad 3b$$

가 되는 데 이를 정리하면

$$i_{k,m}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{ e_k(t) - e_m(t) \} + I_{k,m}(t-\Delta t) \quad 3c$$

가 된다 여기서

$$I_{k,m}(t-\Delta t) = i_{k,m}(t-\Delta t) - \frac{2c}{\Delta t} \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \}$$

는 Past history이고 以上の 結果를 等價回路로 表示하면 그림 5-b와 같다.

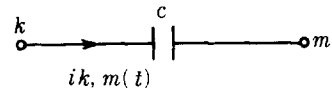


그림 5-a. 커패시턴스 회로

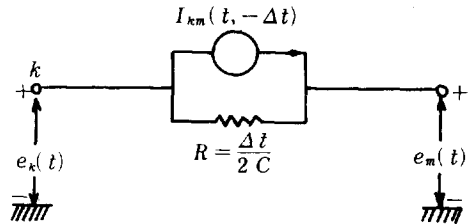


그림 5-b. 커패시턴스의 等價回路

(4) 分布整數 회로

그림 6-a와 같이 絶點 k, m 사이에 分布整數 回路가 連結되어 있을 境遇 送電線路의 距離 x와 電壓·電流에 關한 方程式은 式 4a, 4b와 같다.

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = L' \frac{\partial i}{\partial t} \quad 4a$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C' \frac{\partial v}{\partial t} \quad 4b$$

여기서 L, C'는 送電線路 單位 길이당의 인덕턴스 및 커패시턴스이다. 위의 微分方程式을 d'Alembert의 整理를 利用하여 풀면 式 4c, 4d가 된다.

$$i(x, t) = f_i(x - \alpha t) + f_r(x + \alpha t) \dots \dots \dots 4c$$

$$v(x, t) = Z \cdot f_i(x - \alpha t) - Z f_r(x + \alpha t) \dots \dots 4b$$

여기서

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} ; \text{써-지 임피던스}$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} ; \text{傳播速度}$$

$f_i(x - \alpha t)$; 速度 α 로 進行하는 入射波

$f_r(x + \alpha t)$; 速度 α 로 進行하는 反射波

이다.

要求되는 支路方程式은 式 4c 에 Z를 곱하여 4b 式과 合하면 된다 즉

$$v(x, t) + Z i(x, t) = 2 \cdot Z \cdot f_i(x - \alpha t) \dots 4e$$

윗 式에 依하면 $v(x, t) + Z \cdot i(x, t)$ 는 $(x - \alpha t)$ 가 變化하지 않는 한 一定한 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 送電線路에서의 減衰를 無視하면 $t - \tau$ (τ 는 k, m 간 進行波의 進行 時間)에 絶點 k 를 出發하여 m 을 向해 進行하는 進行波, 電壓 $v_k(t - \tau) + Z \cdot i_{k,m}(t - \tau)$ 는 τ 時間 後에 絶點 m 에 入射하는 進行波 電壓과 同一하여야 하므로

$$v_m(t) + Z \cdot \{-i_{m,k}(t)\} = v_k(t - \tau) +$$

$$Z \cdot i_{k,m}(t - \tau) \dots \dots \dots 4f$$

가 成立하여야 한다. 따라서

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z} \cdot v_m(t) + I_m(t - \tau) \dots \dots \dots 4g$$

가 되고 같은 方式으로

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z} \cdot v_k(t) + I_k(t - \tau) \dots \dots \dots 4h$$

가 되는 데 여기서

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{Z} v_k(t - \tau) - i_{k,m}(t - \tau),$$

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z} v_m(t - \tau) - i_{m,k}(t - \tau)$$

로써 역시 past history이다. 이 過程에서 past history의 管理에는 特別한 주의가 必要하다. 왜냐하면 L 및 C 回路에서는 $t - \Delta t$ 에 計算된 값만을 컴퓨터에 記憶시키면 되나 分布整數 回路에서는 兩端의 各 絶點마다 τ 동안의 計算値가 必要하게 되므로 支路 1 個당 $\frac{2\tau}{\Delta t}$ 個의 履歷이 記憶되어야 하기 때문이다.

위의 4g, 4h 을 損失이 있는, distortionless 線路에 適用 時에는 減衰整數 $e^{-\frac{R}{L}t}, \tau$ 를 곱해주면 역시 正確한 提供할 수 있으나 一般的으로 送電線路는 distortionless가 아니므로 이 때에는 近似解로서 減衰를 表示하게 되는 데 通常 線路 兩端에 直列 抵抗值 $1/4$ 씩을, 線路 中間에 $1/2$ 挿入하면 充分한 水準의 近似解를 얻을 수 있다.

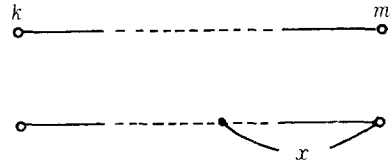


그림 6-a. 分布整數 回路

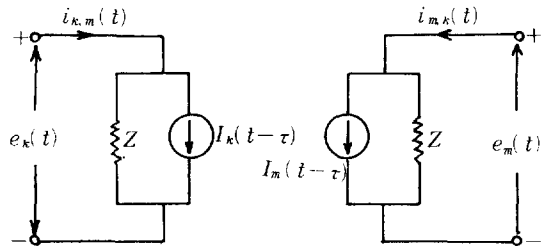


그림 6-b. 分布整數 回路의 等價回路

(5) 絶點方程式의 解法

以上的 過程에서 解析하고자 하는 系統의 모든 支路에 對하여 等價 임피던스 (실제는 抵抗으로 看做할 수 있음) 回路를 만든 후 各 絶點에 關한 絶點方程式을 세우면 式 5a 와 같다.

$$[G] [V(t)] = [i(t)] - [I] \quad 5a$$

여기서

$[G]$: 絶點 컨덕턴스 行列 ($n \times n$)

$[V(t)]$: 時間 t 에서의 絶點電壓 벡터 ($n \times 1$)

$[i(t)]$: 時間 t 에서의 絶點에 流入하는 電流 源 벡터 ($n \times 1$)

$[I]$: 已知 (履歷事項)의 電流 벡터 ($n \times 1$)

인데 $[G]$ 는 Δt 가 일단 정해지면 一定한 값을 가지게 되므로 EMTP로 過渡現象을 計算할 때에는 一定한 Δt 를 使用하는 것이 計算速度 面에서 대단히 有利하다. 한편 絶點 電壓中에는 已知의 값도 있으므로 (電壓源等) 이러한 境遇에는 未知의 絶點 電壓의 集合을 A, 已知의 電點 電壓의 集合을 B 라 하면 5b 式과 같이 部分行列로 表示가 可能하다.

$$\begin{bmatrix} [Y_{AA}] & [Y_{AB}] \\ [Y_{BA}] & [Y_{BB}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [i_A(t)] \\ [i_B(t)] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [I_A] \\ [I_B] \end{bmatrix} \quad 5b$$

5b의 式에서 既知의 部分을 除去하면 5c 式이 되는 데

$$[Y_{AA}] [V_A(t)] = [I_{total}] - [Y_{AB}] [V_B(t)] \quad 5c$$

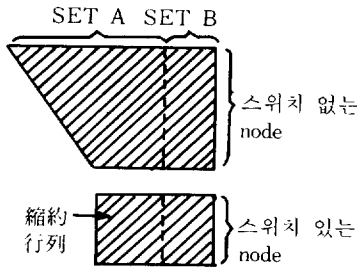
여기서

$$[I_{total}] = [i_A(t)] - [I_A] \text{ 이다.}$$

따라서 Δt 마다 5c 式을 풀면 絶點 電壓을 求할 수 있고 일단 絶點 電壓을 알면 支路 電流, 電力, 에너지 등을 알 수 있다. 그런데 前述한 바와 같이 Δt 를 一定하게 하면 $[Y_{AA}]$ 는 不變의 값을 가지므로 time step loop 밖에서 初期에 $[Y_{AA}]$ 를 한번만 三角因數化 (triangularization)하면 스위치의 開閉 및 非線形 要素가 없는 한 Δt 마다 5c 式의 右邊만 反復計算하면 된다.

(6) 스위치 開閉 및 非線形 要素

解析하고자 하는 系統에 스위치를 包含하는 境遇에 는 그림 7-a와 같이 母線 컨덕턴스 行列의 上部에 스위치가 없는 絶點들의 集合을 下部에 스위치를 包含하는 絶點들의 集合을 配列한 다음 上部 行列은 時間의 變化에 無關하므로 前述한 바와 같이 初期에 한번만 三角因數化하고 下部 行列은 Δt 마다 스위치의



SETA : 未知 SETB : 既知
그림 7-a. Switch 含包時 初期配置

開閉 如不를 確認하여 變化가 있는 部分만을 選擇하여 正方向行列을 構成한 後 이들에 대한 部分的 三角因數化를 實行한 다음 必要한 電壓, 電流 등을 求하면 된다. 이 때 正方向行列의 크기는 動作되는 스위치의 數에 따라 달라지게 되는 데 이를 圖示하면 그림 7-b와 같다. 한편 系統에 그림 8-a와 같이 한 개만의 非線形 要素가 包含되어 있을 境遇에 對하여 考察하기로 하자 이 때 $i_m = i_{k,m}$, $ik = -ik$, m 이라 하고

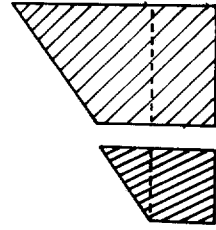


그림 7-b. Switch 變化時 (下部 行列만 三角因數化)

$[z]$ 를 $[Y_{AA}]^{-1}$ 行列의 m 번째 列과 k 번째 列의 差라고 하면 5c 式에서 6a 式을 얻을 수 있다.

$$[V_A(t)] = [V_A^{선형}(t)] + [z] i_{k,m}(t) \dots 6a$$

여기서 $[V_A^{선형}(t)]$ 는 非線形 要素를 開放하였을 때의 未知의 絶點 電壓이다. 6a 式에서 $i_{k,m}(t)$ 를 求하면 $[V_A(t)]$ 를 求할 수 있는 데 이는 그림 8-b와 같이 系統의 테브난 等價回路의 直線

$$\begin{aligned} V_{k,m}(t) &= V_k(t) - V_m(t) \\ &= V_k^{선형}(t) - V_m^{선형}(t) + (z_k - z_m) \cdot i_{k,m}(t) \end{aligned} \quad 6b$$

와 非線形 要素의 V-I 特性

$$V_{k,m}(t) = f[i_{k,m}(t)] \quad 6c$$

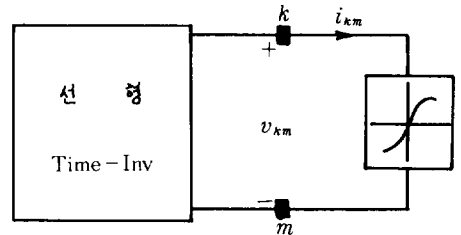


그림 8-a. 非線形 要素를 (1個만) 包含한 系統

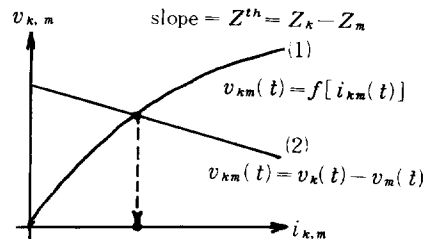


그림 8-b. 時間 t 에서의 非線形 要素의 特性

의 交點으로 부터 求해진다. 萬一 系統에 여러개의 非線形 要素들이 分布整數 回路에 依하여 連結되어 있을 때는 Bergeron의 方法에서는 서로 開放된 狀態로 看做되므로 各各의 部分 系統이 한 개의 非線形 要素를 가지는 境遇가 되므로 앞에 說明한 方法으로 計算이 可能하게 된다. 다만 스칼라량인 $z^{th} (=z_k - z_m)$ 이 行列로 表示된다는 것이 다를 뿐이다.

5. 韓電의 EMTP 適用實例

(1) 154 kv 架空 地中 送電線路의 피뢰기 省略 檢討

154 kv 케이블의 巨長이 길어짐에 따라 同一 母線에 連結된 케이블의 길이도 점점 增加하는 傾向이 있다. 그런데 지금까지 通常 架空線路와 地中케이블이 連結되는 地點에는 피뢰기를 使用해 왔는데 이러한 피뢰기가 動作時에는 充電電荷가 피뢰기를 通하여 放電하므로 피뢰기에 큰 負擔을 주게된다. 그러나 OF, POF 케이블에서는 雷썬-지의 減衰가 크므로 一定한 距離를 썬-지가 進行하면 波高值가 현저히 줄어들게 되며 154 kv 系統 絶緣은 주로 雷 썬-지에 依하여 結定된다. 이러한 點에 着眼하여 檢討 結果 케이블의 距離가 約 4.5 km 以上에서는 피뢰기를 省略할 수 있다는 結論을 얻었다.

(2) 345 kv 系統의 開閉 썬-지 分析 및 最適 開閉 抵抗值 計算

韓電 345kv 系統에 있어서의 開閉 썬-지 過電壓은 線路의 距離, 再開路 方法, 電源의 임피던스 등에 따라 큰 差異를 보이고 있으나 最大 4.0 p.u 까지 나타나고 있다. 이와 같은 開閉 썬-지 過電壓을 抑制하는 方法으로는 피뢰기 使用이나 開閉抵抗器의 使用 등을 들 수 있겠다. 그러나 피뢰기에 依한 制限은 피뢰기 自體의 質은 動作으로 因한 事故 可能性을 높여주게 되며 過電壓 制限 效果도 開閉抵抗器에 미치지 못함을 알 수 있었다. 따라서 開閉 抵抗器에 依한 開閉 썬-지 過電壓 抑制 對策이 바람직하다는 結論을 얻었으나 이 抵抗值 역시 系統의 條件에 따라 크기가 달라진다. 여러 條件에 對한 檢討 結果 開閉 抵抗은 500 Ω 程度가 最適이라는 것을 알게 되었고 過電壓도 2.0 p.u 以下로 抑制할 수 있게 되었다.

(3) 345 kv 送電線路 燃架

送電線路를 燃架하는 目的은 主로 線路整數의 平衡에 依한 誘導障害 防止, 逆相分 電流 發生에 依한 發

電機에 주는 惡影響 除去, 線路損失의 輕減等이라 하겠다. 檢討 結果 非燃架로 因한 誘導障害 增加問題는 無示할 정도였으며 逆相分 電流 역시 正相分 電流의 5% 水準으로서 發電機의 許用限度(9%) 以內이었으나 線路距離가 50 km 以上일 때에는 燃架로 因한 損失 輕減 利得이 所要 工事費보다 크게 되므로 燃架를 시키는 것이 有利하다는 結論을 얻었다. 燃架의 效果는 燃架 方法에 依해 달라지게 되는데 위의 結論은 2回線 共히 2回 燃架時에 대한 것이다.

(4) 送電線路의 雷事故率 計算

送電線路의 直擊雷 및 逆閃絡에 依한 事故率을 適正水準 以下로 維持하기 위한 遮蔽角과 塔却接地 抵抗值를 찾아내는 作業으로서 韓電의 設計基準에 反映시키기 爲한 檢討를 繼續中에 있다.

(5) 無效電力 補償裝置의 效果 檢討

다이리스터에 依한 리액터 制御 및 커패시터 開閉를 通하여 系統 母線 電壓을 一定한 水準으로 維持시킬 수 있으며 過渡安定度를 向上시킴으로 因하여 送電容量의 大幅 增大가 可能하다는 事實이 밝혀져 最近 이에 대한 研究가 活發히 進行中에 있다. 韓電에서도 이의 適用可能性을 檢討하기 爲하여 EMTP를 利用한 過渡安定度의 向上 效果 및 高調波 發生의 程度, 防止對策에 對한 模擬化가 進行中에 있다.

6. 맺는 말

以上 紹介한 바와 같이 EMTP는 凡用性이 풍부한 프로그램이며 現在도 그 機能을 補強하기 위한 研究가 계속되고 있다. 우리가 조금만 關心을 가진다면 磁氣 테이프 구입과 取扱에 必要한 實費用으로 EMTP를 入手할 수 있으며 最近에는 大型컴퓨터가 아닌 mini 컴퓨터나 micro 컴퓨터에도 설치하여 使用이 可能하게 되었다 한다. 그러나 우리나라에서는 韓電을 비롯한 극히 一部 研究所에서만 使用을 하거나 設置를 考慮하고 있는 實情이다. 한 편 BPA의 Meyer 博士에 의하면 지난 9月 FMTP 開發에 關한 4百萬 弗의 契約이 關聯 業體와 BPA의 合同으로 締結되어 이 開發이 完了된다면 參與 業體들에서 所有權을 主張할 지도 모르기 때문에 EMTP의 無料 配分을 保障할 수 없게 될 때가 오게 되리라는 見解이다. 우리나라에서도 多數의 EMTP 使用者들이 出現하여 이 分野에 대한 技術水準 向上이 조속히 이루어 지기를 期待해 마지 않는다.