

창립
40주년 학술대회
논문 87-M-21-1

配電系統 突入電流 檢出 알고리즘에
關한 研究

*尹 滿 徹 **權 旭 鉉, 李 起 元
*한전 기술연구원, 서울대

A Study on the Inrush Current Detecting
Algorithm in Power Distribution System

* Man - Chul Yoon , ** Wook - Hyun Kwon, Ki - Won Lee
KEPCO Research Center , Seoul National University

ABSTRACT

This paper presents the detecting algorithm of inrush current which causes protective equipment to maloperate in energizing a power distribution line.

This detecting algorithm uses the method which extracts the decay component and energy of 2nd harmonics by Prony Spectral Estimation Method existed AR model to new ARMA model.

In this paper, the inrush currents are obtained by model simulations and field tests.

By applying these data to the detecting algorithm, it has been confirmed to discriminate inrush currents from fault currents.

1. 序 論

配電系統의 장거리 分岐線, 幹線 또는 故障이 發生 線路에 리크로저 (Recloser)를 설치하여 系統에 故障이 發生되면 해당 分岐線 또는 幹線만 遮斷되게 하고 나머지 健全區間에는 電力供給이 될 수 있도록 保護裝置를 쓰고 있다. 그러나 配電設備의 신, 중설 또는 補修工事後에 配電線을 加壓 (Energizing) 하면 突入電流로 인하여 保護裝置가 誤動作하여 電力供給을 遲延시키고, 停電時間을 延長시켰다.

이러한 突入電流의 特性解析을 위하여 18세기 말경에 Prony 에 의해 開發된 Exponential Approximation 방식을 AR線形預測으로 具現한 期存의 Prony 방식에서

ARMA경우로 擴張한 Extended Prony 방식을 실험용 측정치에 적용하여 2 조파의 減衰成分과 에너지를 抽出 함으로써 突入電流와 事故電流를 구별할 수 있었다.

2. 突入電流의 一般特性

(1) 突入電流의 最大値 (7)

突入電流의 最大値를 支配하는 要因은 여러가지가 있다. 즉 變壓器 結線 및 加壓位置, 加壓位相角 單相 혹은 3 相의 變壓器구성, 雜質, 용량, 선로임피던스 등이 있다 (1-3) (7).

이들 각각의 最大値를 살펴보면 단상변압기 3 대로 구성된 3 相變壓器와 3 各 鐵心으로 구성된 3 相 變壓器間에 最大値에서 다소 差異가 난다.

一般的으로 3 角 鐵心 變壓器쪽이 單相 變壓器 3대인 경우보다도 突入電流의 最大値도 크다.

동심배치 捲線에서는 外側捲線 (일반으로 高壓捲線)에 電壓을 인가한 쪽이 內側捲線 (일반으로 低壓捲線)에 인가한 경우보다 突入電流는 적다. 이것은 外側捲線쪽이 內側捲線보다 空心임피던스가 크기 때문이다.

表 2.1는 그 일례를 表示하였다.

表 2.1 鐵心の 材質과 印加電壓에 대한 突入電流

變 壓 器 容 量 (KVA)	(정격전류/돌입전류의 최대치) 배수			
	방향성 拘소 강판철심		역간압연 拘소 강판철심	
	고 압 측	저 압 측	고 압 측	저 압 측
500	11	16	6.0	9.4
1,000	8.4	14	4.8	7.0
5,000	6.0	10	3.9	5.7
10,000	5.0	10	3.2	3.2
50,000	4.5	9	2.5	2.5

(2) 突入電流의 減衰 (18)

變壓器 無負荷時의 基本式은

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} E \sin \omega t \dots\dots\dots (2.1)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $i(t)$ 를 풀면

$$i(t) = \frac{2E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \left[\sin(\omega t - \tan^{-1} \frac{X}{R}) - \frac{R}{X} \sin(\omega t + \theta) + e \cdot \sin(\theta + \tan^{-1} \frac{X}{R}) \right] \dots\dots\dots (2.2)$$

이 된다.

(2.2) 式에서 볼 수 있듯이 突入電流는 제1 파에서

최대로 되고 그후는 回路의 時定數 $\frac{L}{R}$ 에 따라서 減衰한다.

R로서는 전원 및 권선의 抵抗과 와류손, 히스테리시스손에 의한 등가저항을 포함한 全저항을 使用하고 L로서는 전원의 인덕탄스와 加壓捲線의 瞬時勵磁 인덕탄스를 합한것을 使用한다.

따라서 $\frac{L}{R}$ 치는 일정하지 않고 時間의 경과와 함께 變換한다. 예를들면 제1파의 값이 클때는 인덕탄스로서 空心 인덕탄스를 취하면 좋지만 突入電流가 어느정도 減衰하면 鐵心의 比投磁率이 1이 안되고 本 인덕탄스로 되기 시작한다. 이 때문에 減衰의 경과를 바르게 산출하는 것은 困難하다.

突入電流의 減衰時間은 表 2.2과 같이 최대치의 50%까지 減衰하는데 8 ~ 10 사이클에서 수분대까지 있으며 容量이 클수록 減衰時間이 길게 나타난다.

표 2.2 突入電流의 減衰時間

變壓器 (KVA)	돌입전류가 50% 감쇠하는 시간 (C/S)
500 - 1,000	최대 8 - 10 (變壓器設計에 따라다름)
1,667-10,000	최대 10- 60 (變壓器設計에 따라다름)
10,000이상	최대 60-3600 (變壓器設計에 따라다름)

(3) 突入電流의 高調波 成分 (18)

突入電流의 波形을 高調波 成分別로 分析한 分析한 例를 表 2.3에 表示하였다.

表 2.3에서 볼 수 있듯이 제 2조파가 우세하며 제 3 조파는 훨씬 적은 것을 알 수 있다.

表 2.3 突入電流의 波形 分析値

구 분	12 MVA 3 상 변압기	10 KVA 단상 변압기	단상 변압기	단상 변압기
기 본 파	100 %	100 %	100 %	100 %
2 조 파	59	62	57.7	58
3 조 파	64.5	50	63.0	63
4 조 파	24.5	9.4	26.8	22
5 조 파	11.0	5.4	5.1	5
6 조 파	4.4	-	4.1	3.4

3. 突入電流 모델 사용예이선

3.1 突入電流 모델 포물레이션

變壓器 2 차측 負荷를 考慮한 突入電流의 모델 포물레이션은 다음과 같다. 단, 式을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 假定한다.

(1) 그리 3.1에서 漏泄 인덕탄스 L_{11}, L_{22} 는 무시하며 따라서 ϕ_{11}, ϕ_{22} 도 무시한다.

(2) 1 차측 선로정수 R.L.C는 무시한다.

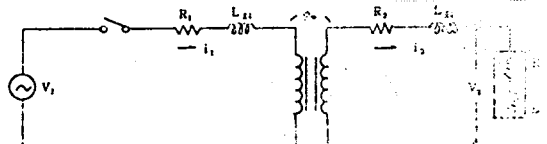


그림 3.1 變壓器 및 負荷等價回路

$$V_1 = R_1 i_1 + \frac{d\phi_1}{dt} = R_1 i_1 + N_1 \frac{d}{dt} (\phi_{11} + \phi_m) \approx R_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$V_2 = -R_2 i_2 + \frac{d\phi_2}{dt} = -R_2 i_2 + N_2 \frac{d}{dt} (-\phi_{12} + \phi_m) \approx -R_2 i_2 + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \dots\dots\dots (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式을 정리하면

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{N_2}{N_1} \left(-\left(\frac{N_2}{N_1}\right)\left(\frac{R_1}{L}\right)i_1 - \left(\frac{R+R_2}{L}\right)i_2 + \frac{N_2}{N_1} \frac{V_1}{L} \right) + \frac{V_1 - R_1 i_1}{N_1^2 \left(3a (N_1 i_1 - N_2 i_2)^2 + 2b (N_1 i_1 - N_2 i_2) + c \right)}$$

= term 1 + term 2

2 차측 抵抗負荷 (R)는 $N_1 i_1$ 의 ϕ_1 에 對應하는 $N_2 i_2$ 의 ϕ_2 를 즉시 발생시킨다.

그러나 2 차측의 L 負荷는 $N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$ 로 만드는 데 時間遲延이 있으므로 突入電流가 존재한다.

(3) 결과적으로 2 차측 負荷를 고려한 시에는 부하 측 L 의 값이 클수록 突入電流가 오래 지속되고 부하측의 R 의 값이 클수록 돌입 電流가 적어진다.

2 차측이 開放된 경우는 起磁力이 $N_1 i_1$ 이므로 가장 심한 突入電流가 흐른다.

3.2 突入電流 모델 시뮬레이션 흐름도

3.1 節에서 구한 突入電流에 관한 식들을 利用하여 突入電流 모델 시뮬레이션하기 위한 흐름도를 그림 3.2에 表示하였다.

突入電流 모델 시뮬레이션 전체 흐름도는 다음과 같다.

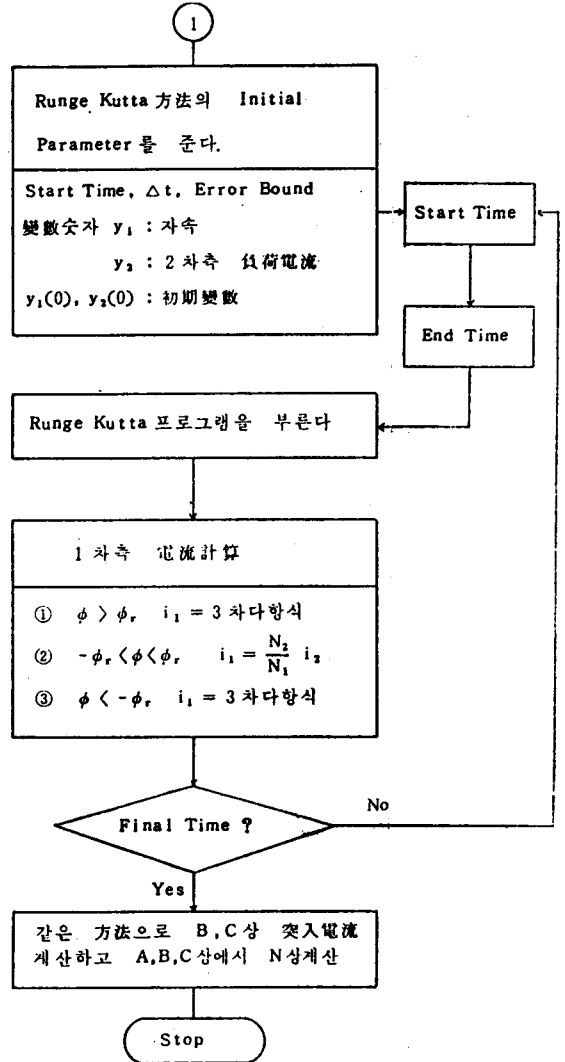
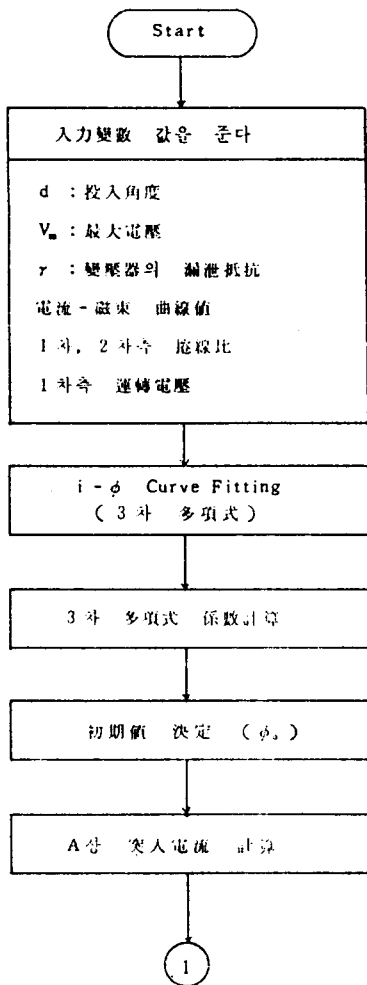


그림 3.2 突入電流 모델 시뮬레이션 흐름도

3.3 시뮬레이션 結果

(1) 히스테리시스 루프 簡略化 모델

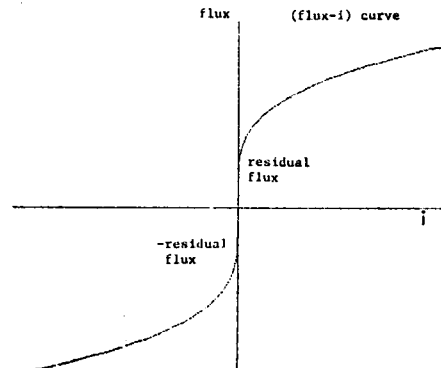


그림 3.3 히스테리시스 루프 簡略化 모델

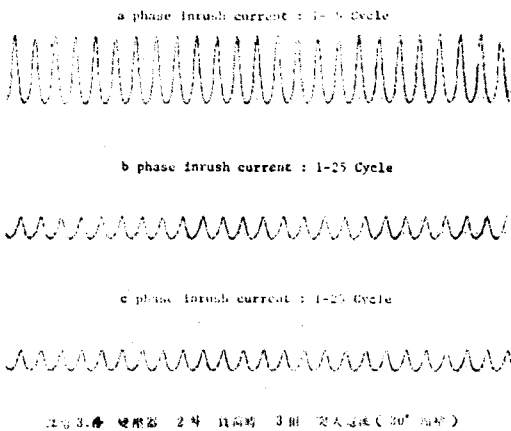
(2) 突入電流 波形

變壓器 2 차 負荷時 3 相 突入電流 시뮬레이션 結果 30° 에서 加壓時의 3 相 突入電流 시뮬레이션 波形은 그림 3.4와 같다.

시뮬레이션하기 위한 條件은 다음과 같이 假定하였다.

$N_1 : N_2 = 10 : 1$, 負荷 R: 100Ω L: 1 Henry
 捲線抵抗: 0.55Ω 捲線리덕탄스는 무시함

그림에서 볼 수 있듯이 B,C 상 突入電流에 비해 A 상 突入電流가 3-4 배 크며 오래 지속됨을 볼 수 있다.



4. 突入電流 檢出 알고리즘

(1) ARMA Prediction Model (Extended Prony Spectral Estimation Method)

AR Model 에서와 같은 方法으로 ARMA 경우로 까지 擴張하여 보면

$$\begin{aligned}
 x_n &= \hat{x}_n + e_n \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i e_{n-i} + e_n \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i (\hat{x}_{n-i} + e_{n-i}) + \sum_{i=1}^q b_i e_{n-i} + e_n \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}_{n-i} - \sum_{i=1}^p a_i e_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i e_{n-i} + e_n \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}_{n-i} + e_n \\
 &= \hat{x}_n + e_n \quad \dots \dots \dots (4.1)
 \end{aligned}$$

여기서, $e_n \triangleq -\sum_{i=1}^p a_i e_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i e_{n-i} + e_n$ --(4.2)

로 정의하면 結果的으로 AR에서와 똑같은 Exponential Model 로 표시되어진다. 그러나 식 (4.2)에서 처럼

Exponential Approximation Error(e)이 에서의 ARMA Model 로 表示되어짐을 알 수 있다.

또한 Extended Prony Spectral Estimation 의 課程 을 그림으로 나타내면 그림 4.1와 같다.

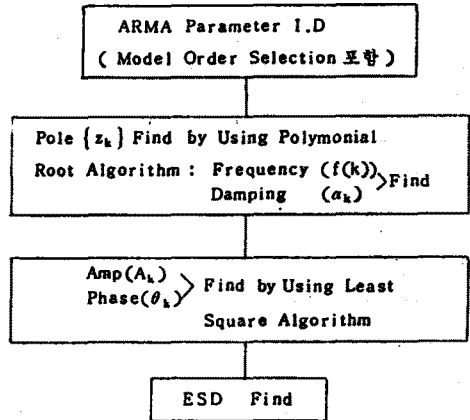


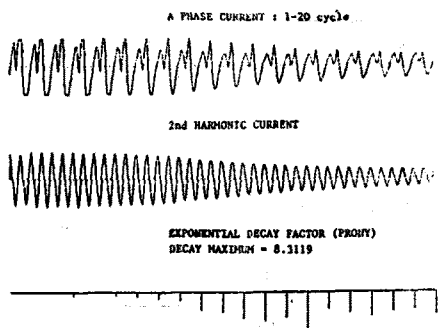
그림 4.1 Extended Prony Spectral Estimation Procedure

(2) 實系統 測定値 分析

測定値에서 2 調波를 Filtering 한후 Extended Prony 方法에 適用하여 減衰係數와 에너지를 구하였다. 그림 5.1에서는 配電線 Recloser 投入時 突入電流를 分析하였다.

여기서 突入電流이 특징은 減衰係數가 (-)측에만 나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 I.D 는 ARMA (2 차) Model 을 썼으며 1 週期 Exponential Sliding Window를 썼다.

또한 2 高調波 Filtering 에서 Filter는 FIR Filter 를 사용하였으며 次數는 256 번을 3 회 반복하게 하고 샘플시간은 (16.66ms/16) 을 썼어, 샘플주파수는 60 X 16 = 960 Hz (80Hz를 16 Point로 나눔 9) 로 하고 Band Pass Filter (100 - 140 Hz) 로 하였다.



2nd HARMONIC POWER SPECTRUM (20 cycle)
MAXIMUM POWER = 77.0535 J

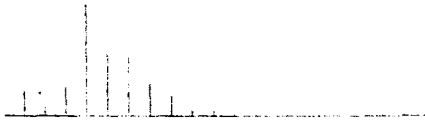


그림 5.1 配電線 리크로자 投入時 突入電流 分析

위 그림은 154kV 서청주 S/S 22.9kV 청미 D/L 리크로자 投入時 발생한 突入電流의 分析結果로서 2 조파 윌버우 減衰係數는 (-)쪽에만 나타나고 있음을 보여준다. 2 조파 에너지도 처음에 나타나다가 減衰와 反比例로 없어지고 있다.

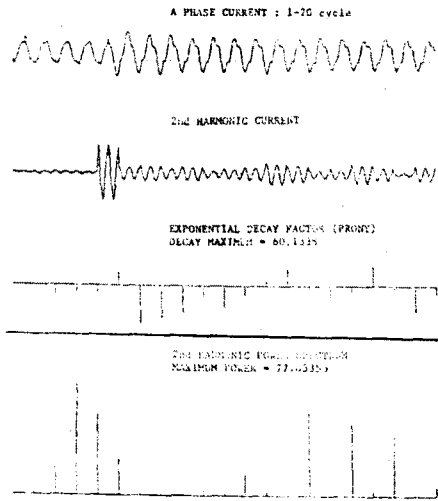


그림 5.2 高抵抗 地絡事故電流의 分析

위 그림은 154kV 정음 S/S 22.9kV 정음 D/L이 보도블럭에 地絡되었을때의 事故電流 分析結果이며 2 조파의 減衰係數가 (+) (-) 상하로 나타남을 볼 수 있다.

2 조파 에너지가 變動이 심한것은 地絡事故電流가 아르헨타르로 되어 間歇적으로 흘렀기 때문이다.

5. 結 論

配電系統에 설치된 리크로자의 誤動作은 負荷 加壓時의 突入電流에 의한 것임은 밝혀졌으나, 이 誤動作 防止를 위한 突入電流 檢出은 대단히 복잡하고 어려운 課題이었다. 따라서 이에관한 研究論文을 文獻상에 찾아 볼 수 없었다.

이와같이 未解決分野인 突入電流 檢出에 대하여 그 方法의 일예를 提示하였으며, 시뮬레이션과 실측을 통

하여 實證하였다.

檢出 알고리즘은 Prony 의 Spectral Estimation方法에 根據를 두고 既存 AR Model에서 ARMA Model로 擴張, 誘導하여 適用하였다.

檢出方式은 주어진 데이터에서 2 조파만을 檢出하여 그 減衰係數의 結果로서 突入電流와 事故電流를 區別할 수 있었다. 즉 突入電流는 (-)쪽에만 나타나지만 事故電流나 負荷電流는 (+) (-) 양쪽에 分布됨을 알 수 있었다.

앞으로의 課題는 이 檢出 알고리즘을 實系統에 適用하기 위하여는 計算時間 短縮과 하드웨어 構成에 의한 實系統 適用試驗을 거쳐야 할 것이다.

參 考 文 獻

- (1) J.E. Holcomb, "Distribution Transformer Magnetizing Inrush Current," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-80, Dec, 1961 pp.697-702
- (2) W.K. Sonnemann, C.L. Wagner, G.D. Rockefeller, "Magnetizing Inrush Phenomena in Transformer Banks," AIEE Trans, Vol.77, Oct. 1958, pp.884-892
- (3) Hung Jen Li, "Power Transformer Characteristics and Their Effect on Protective Relays", W. H Silent Sentinels, March 1976, pp.1-10
- (4) Steven M. Kay, Stanley Lawrence Mapple, JR., "Spectrum Analysis-A Modern Perspective", Proc. IEEE, Vol. 69, No.11 Nov. 1981, pp.1380-1419.
- (5) Theodore R. Specht, "TRANSFORMER Inrush and Rectifier Transient Current," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-88, No. 4, Apr. 1969, pp.269-276.
- (6) P.Q. Nelson, I.S. Benko, "Determination of Transient Inrush Currents in Power Transformers due to Out-of-phase Switching Occurrences", IEEE Trans. PAS Vol. PAS-90, No. 4, Apr. 1971, pp.1511-1521
- (7) 大 登, 前川定雄 共著, "變壓器 (pp.216-229)" 東京電機大學 出版局, 昭和 43.1.20
- (8) "研究所報 第 18 號 pp.141-155" 韓電, 技術研究院, 1985年 3月.