

# 漏電遮斷器의 特性解析에 關한 研究

## (A Study on Analysis of ELB Characteristics)

金 恩 培\*  
Kim, Un Bae

---

### Abstract

This paper deals with the optimal use of the ELB (Electric Leakage circuit Breaks) for the protection of low voltage distribution system.

Since the ELB is recently used together for grounding fault while only the ground resistance was used in the past, the analysis of ELB characteristics is indispensable. By the quantitative analysis and the setting of limit the ground resistance and the ELB is derived and then the optimal use of the ELB is expected to contribute to the system protection.

---

### 1. 序 論

現在 우리나라에서는 電力需要의 增加에 따라 電力의 効率的인 活用の 一環으로 低電壓配電系統을 昇壓供給하는 過程에 있어 이에 相應하는 安全化 對策의 研究가 切實하게 要求된다.

一般的으로 低電壓電路에서 人體의 感電災害는 電氣機器, 器具類에서 야기하는 漏電으로 因한 感電事故가 大部分이다. 이러한 感電事故를 防止하기 위해서는 低電壓配電電壓의 昇壓에 따라 接地保護에만 依存할 수 없게 되었고, 漏電遮斷方式이 必要하게 되었다. 특히 漏電遮斷器는 漏電時 電路遮斷을 圖謀하는 有効한 手段으로, 感電災害防止의 一役을 담당하고 있다.

本 論文에서는 既存의 接地保護方式에 漏電遮斷方式을 새로이 導入하여, 漏電遮斷器를 併用

할 때 그의 正常動作을 위하여 適合한 特性의 限界値를 밝히므로써 漏電遮斷器를 活用함에 있어 最適의 保護特性을 규명하는데 目的을 두고 있다.

### 2. 漏電遮斷器의 定量的 解析

漏電遮斷器는 1928년에 西獨에서 最初로 “充電部に 接觸된 人體에 흐르는 電流를 零相變流器로 檢出하여 被害 發生前에 高速遮斷으로 保護하는 方法”으로 發表되었다.<sup>1)</sup> 그 當時에는 人體通過電流의 限界値를 50[mA·sec]로 設定하고<sup>2)</sup> 10倍의 安全率을 取하여 定格動作電流 50[mA]인 漏電遮斷器가 0.1[sec] 以內에 遮斷完了되면 人體保護는 勿論 漏電火災까지 豫防할 수 있는 것으로 알려졌다.<sup>3),4)</sup> 英國에서는 1939년에 이 分野에 關하여 電壓動作形 漏電遮斷方式이 研究 發表되었고, 美國에서는 1962년에 感

\*正會員, 檀國大教授·工博

度電流 5 [mA]까지의 遮斷方式이 發表되기에 이르렀다.<sup>5)</sup> 最近에는 오스트리아의 Biegelmeier 氏의 研究結果로 安全限界範圍를 더욱 具體化하여 1969年 以來에 이에 關한 國際規格 TC - 64 規定까지 새로이 보완하는 傾向에 있다.

漏電遮斷器의 構成은 漏電電流를 檢出하기 위한 零相變流器<sup>6)</sup> (ZCT), 檢出된 電流와 感電安全限界에서 定해진 基準值를 比較하는 比較部, 그리고 比較部의 出力에 의해 電路를 遮斷하는 遮斷部로 되어 있다.

零相變流器는 2次捲線이 감겨져 있는 鐵心の 磁路와 負荷電流가 通電할 수 있는 電路로 構成되며, 地絡時의 事故로 因하여 貫通하는 電路에 電流差가 發生하면 이에 相應하는 出力을 2次捲線에 誘起시킨다. 그림(2-1)은 零相變流器와 電磁石을 連結시킨 等價回路圖이다. 1次, 2次 捲線에 흐르는 電流를 각각  $i_1, i_2$ , 零相變流器의 勵磁電流를  $i_0$ , 鐵心内部의 磁原을  $\Phi$  라하면 이들의 關係는 式(2-1), (2-2) 및 (2-3)으로 나타낼 수 있다.

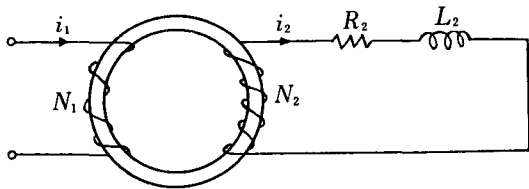


그림2-1. Equivalent circuit of ELB

$$i_1 = i_0 + N_2/N_1 \cdot i_2 \quad (2-1)$$

$$\phi = SN_1 i_0 \quad (2-2)$$

$$N_2 \frac{d\phi}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 \quad (2-3)$$

但,  $N_1$  : 1次捲線數       $r_2$  : 2次捲線抵抗  
 $N_2$  : 2次捲線數       $L_2$  : 2次인덕턴스  
 $S$  : 1次捲線 1回當의 인덕턴스

여기서 1次電流인  $i_1$ 은 實際 零相變流器를 通해 흐르는 純粹電流(net current) 즉 漏電電流이다. 또한 1次捲線인  $N_1$ 은 大部分 1回 또는 數回 程度이며,  $S$ 는 ZCT鐵心の 材質, 斷面積 및 平均磁路의 길이에 의해 決定되는 量이다. 式

(2-1)을 (2-2)에 代入하여  $i_0$ 를 소거하고 다시 式(2-3)에 代入하여 2次電流  $i_2$ 를 1次電流  $i_1$ 으로 表現하면 式(2-4)와 같은 微分方程式으로 된다.

$$(L_2 + SN_2^2) \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 = SN_1 N_2 \frac{di_1}{dt} \quad (2-4)$$

여기서 常數  $a, b$ 를 다음과 같이 定하면

$$a = \frac{r_2}{L_2 + SN_2^2} \quad (2-5)$$

$$b = \frac{SN_1 N_2}{L_2 + SN_2^2} \quad (2-6)$$

式(2-4)는 式(2-7)과 같이 表現된다.

$$\frac{di_2}{dt} + a i_2 = b \frac{di_1}{dt} \quad (2-7)$$

式(2-7)의 漏電電流  $i_1$ 은 驅動項으로서 電源周波數와 同一한 周波數의 正弦波項과 過渡의으로 存在하는 指數項의 疊으로 表現된다. 그러나 遮斷器의 作動要求 時間이 數秒에서 數십 ms로 짧아지고 이것은 商用 電源의 數사이클 以內에서 動作하여야 함을 의미하므로 指數函數의인 電流에 의해 驅動되는 特性에 關해서만 考察하기로 한다.

電流  $i_1$ 은 다음과 같이 定할 수 있다.

$$i_1 = I_{m1} e^{-t/\tau_1} [A] \quad (2-8)$$

여기서  $\tau_1$  : 1次電流의 時定數

$I_{m1}$  : 1次電流의 最大值

이고, 이렇게 定義된 電流에 의해 驅動되는 2次電流는 式(2-7)과 初期值가 零이라는 條件에서

$$i_2 = \begin{cases} I_{m1} \frac{b}{1-a\tau_1} (e^{-t/\tau_1} - e^{-at}) & a\tau_1 \neq 1 \\ I_{m1} \frac{-b}{\tau_1} t e^{-t/\tau_1} & a\tau_1 = 1 \end{cases} \quad (2-9a)$$

$$(2-9b)$$

와 같이 풀이된다. 여기서 2次電流  $i_2$ 는  $a\tau$ 의 값이 1과 같을 때와 같지 않을 때의 두가지 경우로 區別되어 表現됨을 알 수 있다. 그러나 式(2-9b)는 式(2-9a)의 特殊한 경우로서 極限值 計算에 의해 求할 수 있다. 따라서 앞으로는 式(2-9a)만 利用하기로 한다. 1次電流 및 2次電流의 概形은 그림2-2와 같이 나타난다.

特性을 解析하기 위하여 2次電流가 最大로 되는 時間  $T$ 를 求하자. 式(2-9a)의 2次電流  $i_2$ 를 時間  $t$ 로 微分하여 零으로 놓으면

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{dt} &= 0 \\ &= I_{m1} \frac{b}{1-a\tau_1} \left( -\frac{1}{\tau_1} e^{-t/\tau_1} + a e^{-at} \right) \Big|_{t=T} \end{aligned}$$

가 되고 따라서 時間  $T$ 는

$$T = \frac{\tau_1}{a\tau_1 - 1} \ln(a\tau_1) \quad (2-10)$$

와 같이 된다. 또 이 때의 電流  $I_{m2}$ 를 計算하기 위하여 式(2-10)을 式(2-9a)에 代入하면

$$\begin{aligned} I_{m2} &= i_2(t=T) \\ &= I_{m1} \frac{b}{1-a\tau_1} \left( e^{\frac{-1}{a\tau_1-1} \ln(a\tau_1)} - e^{\frac{-a\tau_1}{a\tau_1-1} \ln(a\tau_1)} \right) \\ &= -I_{m1} b (a\tau_1)^{\frac{a\tau_1}{1-a\tau_1}} \quad (2-11a) \end{aligned}$$

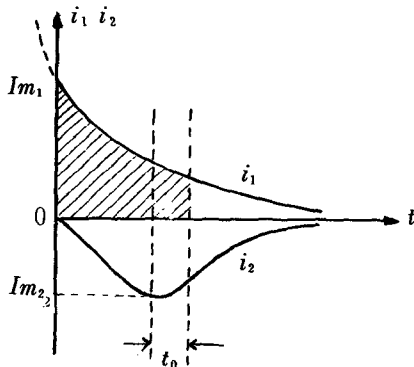


그림2-2. Primary and secondary current Patterns

혹은

$$I_{m2} = -I_{m1} \cdot b \exp \left\{ \frac{a\tau_1}{1-a\tau_1} \ln(a\tau_1) \right\}$$

로 表現된다.

漏電遮斷器가 漏電을 感知하기 始作하여 回路의 遮斷을 完了할 때까지의 1次捲線을 通過 흐를 漏電電荷量(人體를 흐른 電荷量)은 매우 重要한 意味를 가진다는 것은 앞에서 言及한 바 있다. 이 量을 求하기 위하여 漏電遮斷器는 2次電流의 最大值인  $I_{m2}$ 가 되는 時刻  $T$ 에 動作 되게 棼 設計되었다고 보고 機械的 動作 遲延時間을  $t_0$ 라고 假定한다. 그러면 漏電電荷量  $Q$ 는

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{T+t_0} i_1 dt \\ &= I_{m1} \tau_1 \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{1}{1-a\tau_1} \ln(a\tau_1) - t_0/\tau_1 \right\} \right] \quad (2-12) \end{aligned}$$

와 같이 計算된다.

以上과 같이 漏電遮斷器의 定量的 解析을 하였다. 그러나 漏電遮斷器가 正常動作을 한다는 前提條件下에서도 漏電遮斷器方式 系統에 最適活用을 하기 위해서는, 1) 漏電保護를 위한 接地低抗의 協調, 2) 系統內의 漏洩靜電容量의 影響 등을 考慮하여야 한다.

여기서 1), 2)는 研究對象에서 除外하기로 한다.

### 3. 漏電遮斷器의 特性限界

2節에서 漏電遮斷器의 定量的 特性을 調査하기 위하여 零相變流器와 遲延部가 直列로 結線되어 있는 모델링을 하였고 變壓器解析과 同一한 方法으로 2次電流의 波形, 2次電流가 最大로 되는 時間 및 그때까지 漏電된 總 電荷量 등을 計算하였다. 그림2-1을 變壓器의 概念을 導入하여 等價回路로 그리면 그림3-1과 같이 된다.

여기서  $R_2'$ 는 零相變流器의 2次捲線低抗 및

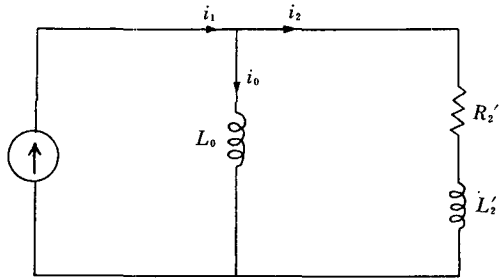


그림3-1. Equivalent circuit of ELB

릴레이부의 抵抗을 1次로 換算한 것이며, \$L\_2'\$ 역시 2次捲線의 漏洩인덕턴스와 릴레이부의 인덕턴스를 1次로 換算한 것이다. 또한 \$L\_0\$는 零相變流器의 勵磁 인덕턴스이며,

$$L_0 = SN_1^2 \quad (3-1)$$

의 關係가 있다. 이때 \$S\$ 및 \$N\_1\$은 2節에서 說明한 것처럼 零相變流器의 捲線 1回當의 인덕턴스 및 1次捲線이다. 漏電遮斷器의 電氣的 時定

數를 \$\tau\$라 하고 回路定數의 값을

$$A = \frac{R_2'}{L_0 + L_2'} = 1/\tau \quad (3-2)$$

$$B = \frac{L_0}{L_0 + L_2'} \quad (3-3)$$

과 같이 定義하면 2次電流 \$i\_2'\$는 式(2-9a)와 같은 모양으로

$$i_2' = I_{m1} \frac{B}{1 - A\tau_1} (e^{-t/\tau_1} - e^{-At}) \quad (3-4)$$

와 같이 된다. 몇가지의 1次電流의 時定數 값에 의한 1, 2次 電流의 時間的인 變化波形은 그림3-2와 같다. 이때 2次電流의 最大値를 (-1)로 固定하였으며, 이를 計算하기 위한 컴퓨터 프로그램의 순서도는 그림3-3과 같다.

第3章에서와 마찬가지로 遮斷器는 2次電流가 最大로 되는 時間 \$T\$에서 動作한다고 하면,

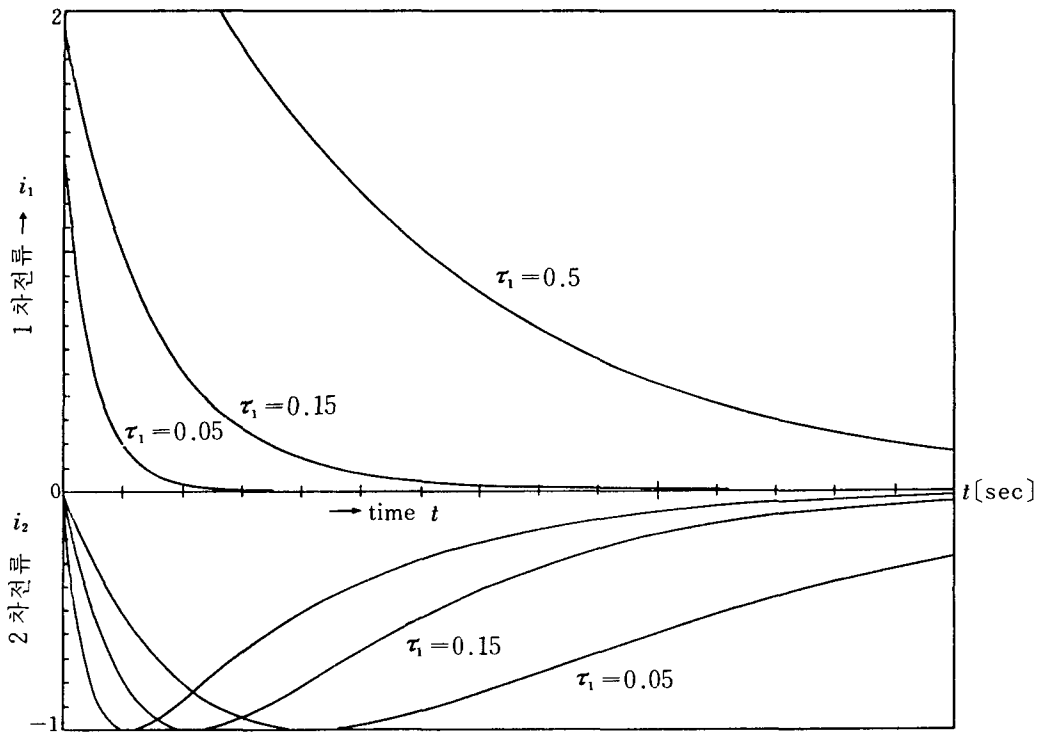


그림3-2. Primary and secondary current patterns.

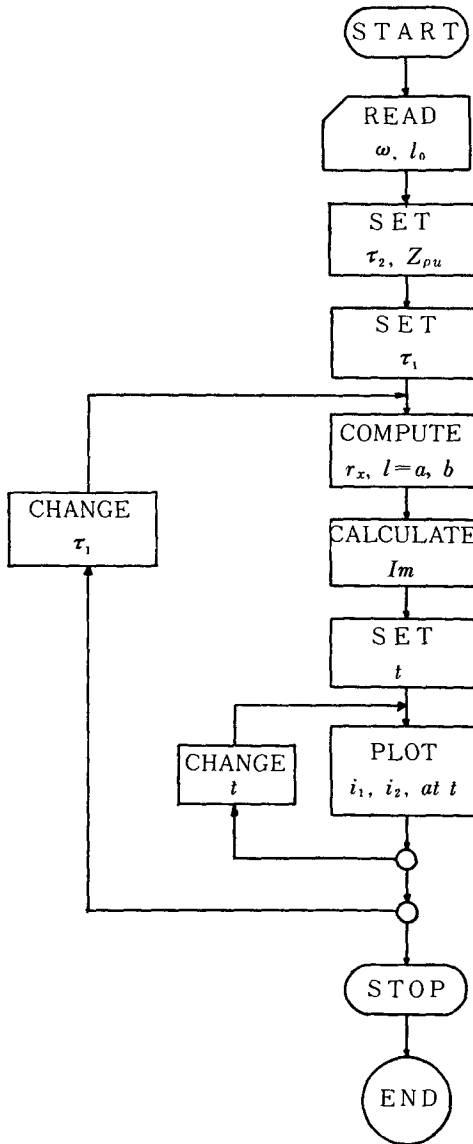


그림3-3. Flow chart for calculation of currents.

$$T = \frac{\tau_1}{A\tau_1 - 1} \ln(A\tau_1) = \tau \cdot \frac{\tau_1/\tau \ln(\tau_1/\tau)}{\tau_1/\tau - 1} \quad (3-5)$$

$$I_{m2} = -I_{m1} \cdot B \cdot \exp\left\{\frac{A\tau_1}{1-A\tau_1} \ln(A\tau_1)\right\} = -I_{m1} \cdot B \cdot \exp\left\{\frac{\tau_1/\tau}{1-\tau_1/\tau} \ln(\tau_1/\tau)\right\} \quad (3-6)$$

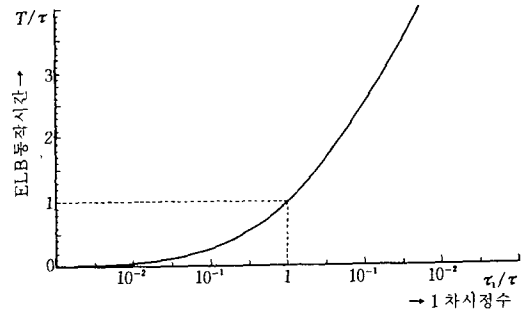


그림3-4. ELB-operating time vs. primary time constant.

과 같이 동작시간  $T$ 와 그때의 전류가 구해진다. 그림3-4는 1차 전류의 시간상수 변화에 따라서 2차 전류가 최대가 되는時刻 즉 누전遮斷器가動作하는 시간을表示하는 것으로서 큰 시간상수의 값에서는遮斷器가動作하기에 많은 시간이要求됨을 알 수 있다. 이는 直流分の 누전電流에對해서는遮斷器가動作될 수 없음을 보여주고 있는 것이다.

그림3-5는式(3-6)을圖示한 것으로서 1차 전류의 시간상수에 대한 2차誘起電流의變化를 나타내고 있다. 여기서도 1차 전류인 누전電流가 큰 시간상수를 가질때 즉 直流分の電流일 때는 2차에誘起되는電流는 거의 없음을 보여주고 있다. 實際 누전遮斷器가動作하기 위해서는 2차捲線에 어떤값 以上の電流가 흘러 스프링의保持力이發生하여야 됨을 감안할때 그림

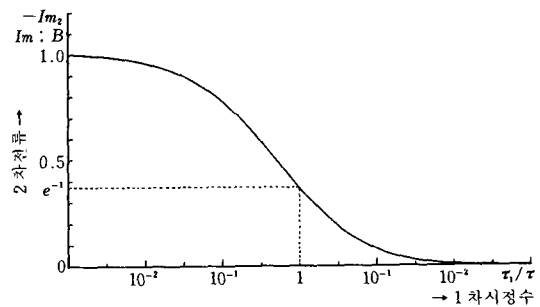


그림3-5. Secondary current of ELB vs. primary current-constant.

3-6과 같은 曲線이 더욱 意味를 갖게 된다.

그림3-6은 그림3-5의 從軸을 逆數로 取한 것이며 2次電流의 最大値가 動作에 要求되는 基準値로 設計될 때 이 값을 만들어 주기 위한 1次電流의 最大値를 나타내고 있다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 漏電遮斷器의 時定數에 비해 큰 時定數의 1次電流가 漏洩되고 있을 때는 莫大한 크기의 1次電流가 要求된다. 이렇게 一定量 以上の 2次電流가 要求될 때 1次電流의 最大値를 구하여 式(2-12)에 代入함으로써 漏電된 總電荷量을 구할 수 있게 된다. 遮斷器의 動作遲延時間  $t_0$ 는 없는 것으로 할 때 電荷量  $Q$ 는

$$Q = I_{m1} \tau_1 \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{1}{1 - A \tau_1} \ln(A \tau_1) \right\} \right] = - \frac{I_{m2}}{AB} (A \tau_1)^2 \left[ (A \tau_1)^{\frac{1}{A \tau_1 - 1}} - 1 \right] \quad (3-7)$$

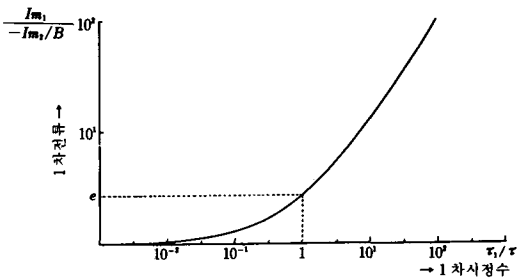


그림3-6. Maximum value vs. time constant of primary current for breaking.

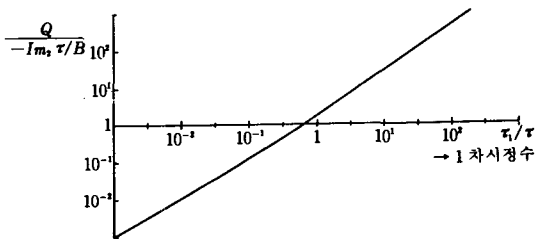


그림3-7. Leakage charge vs. time constant of primary current.

와 같이 計算된다. 式(3-7)에 대한 그래프는 그림3-7과 같으며 兩對數 눈금에 대해 거의 直線의 變化する。

이 그림에서도 쉽게 豫測할 수 있듯이 1次電流의 時定數가 커짐에 따라 遮斷器가 動作할 때까지의 總漏洩電荷量은 커짐을 알 수 있다.

以上에서는 特性이 주어진 漏電遮斷器에 대해서 入力電流인 漏電電流의 時定數 變化에 의한 諸量의 變化를 考察하였다. 그러나 實際로는 要求하는 特性을 갖는 漏電遮斷器를 設計할 수 있는 方法의 摸索이 더욱 重要하다고 생각된다. 漏電遮斷器의 設計라 함은 그림3-1의 回路圖에서  $L_0$ ,  $R_2'$  및  $L_2'$ 를 決定하는 것을 뜻하고,  $L_0$ 는 式(3-1)로 주어지는 勵磁인덕턴스로서 主電源電路인 導體가 모두 貫通할 수 있는 程度의 크기를 갖는 零相變流器의 磁氣的 特性을 代表하고 있다. 따라서 이  $L_0$ 는 電氣設備의 容量에 의해 決定되어지는 量이 되고, 주어진  $L_0$ 와 함께 遮斷器의 特性을 決定하는  $R_2'$  및  $L_2'$ 를 求하기로 한다. 이들의 값을 設定하기 前에 回路의 成分을 좀더 쉽게 把握할 수 있는 量  $Z_{pu}$  및  $\tau_2$ 를 다음과 같이 定義하고 이들 量의 變化에 따른 遮斷器의 特性을 調査하기로 한다.

$$Z_{pu} = \frac{\sqrt{R_2'^2 + \omega^2 L_2'^2}}{\omega L_0} \quad (3-8)$$

$$\tau_2 = \frac{L_2'}{R_2'} \quad (3-9)$$

여기서  $\omega$ 는 電源의 角周波數이고, 그렇게 定義된  $Z_{pu}$ 와  $\tau_2$ 에 의해  $R_2'$  및  $L_2'$ 는 다음 式으로 決定된다.

$$R_2' = \omega L_0 \cdot \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2}} \quad (3-10)$$

$$L_2' = \omega L_0 \cdot \frac{\tau_2 \cdot Z_{pu}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2}} \quad (3-11)$$

이는 前述한 方法에 의해  $L_0$ 가 決定되면  $Z_{pu}$  및  $\tau_2$ 의 값이  $R_2'$  및  $L_2'$ 의 값을 一義的으로 決定하고 있음을 보인다. 式(3-10) 및 式(3-11)을 式(3-1) 및 (3-3)에 代入하면 遮斷器의 回

路定數인  $A (=1/\tau)$ 와  $B$ 는  $Z_{pu}$ 와  $\tau_2$  만의 값으로 表現된다. 즉,

$$A = \frac{\omega Z_{pu}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2} + \omega \tau_2 \cdot Z_{pu}} \quad (3-12)$$

$$B = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_2^2} + \omega \tau_2 Z_{pu}} \quad (3-13)$$

와 같이 되고 이  $A$ 와  $B$ 의 式을 式(3-5) 및 式(3-7)에 代入하면 動作時刻  $T$ 와 漏電電荷量  $Q$ 는 各各

$$T = T(Z_{pu}, \tau_2, \tau_1) \quad (3-14)$$

$$Q = Q(Z_{pu}, \tau_2, \tau_1, I_{m2}) \quad (3-15)$$

와 같은 函數의 形式으로 表現된다. 設計를 할 경우에는 漏電遮斷器의 動作時間  $T$ 와 漏電電荷量  $Q$

의 範圍가 주어지기 때문에, 式(3-14), (3-15)는 2個의 不等式 條件에 대해 4個의 獨立 變數를 갖는 否定條件式이 된다. 그러나 이 경우에서 遮斷器의 2次電流는 任意로 주어질 수 있게 된다. 그 理由로는 2次電流와 릴레이의 捲線數의 곱으로 나타나는 起磁力이 스프링의 保持力을 增加하면 遮斷器가 作動하게 되므로 任意의 電流에 맞추어 스프링의 세기를 調整할 수 있기 때문이다. 또한 1次電流의 時定數  $\tau_1$  은 앞에서 그의 範圍가 設定되는 바와 같이 0.1 ~ 1.2 [ms] 程度이다. 같은 遮斷器에서 直流分이 큰  $\tau_1$ 의 값이 印加되면 動作하기가 어렵게 되므로 이를 考慮하여 充分히 큰  $\tau_1$ 의 값을 주고 設計하면 作動에 問題가 없게 된다. 上記의 理論에서  $I_{m2}$ 와  $\tau_1$ 의 값이 設定되면 式(3-14)와 式(3-15)는 否定方程式이 아니고 풀이가 가능하게 된다. 그러나 이들 數式에는 無理式 및 超

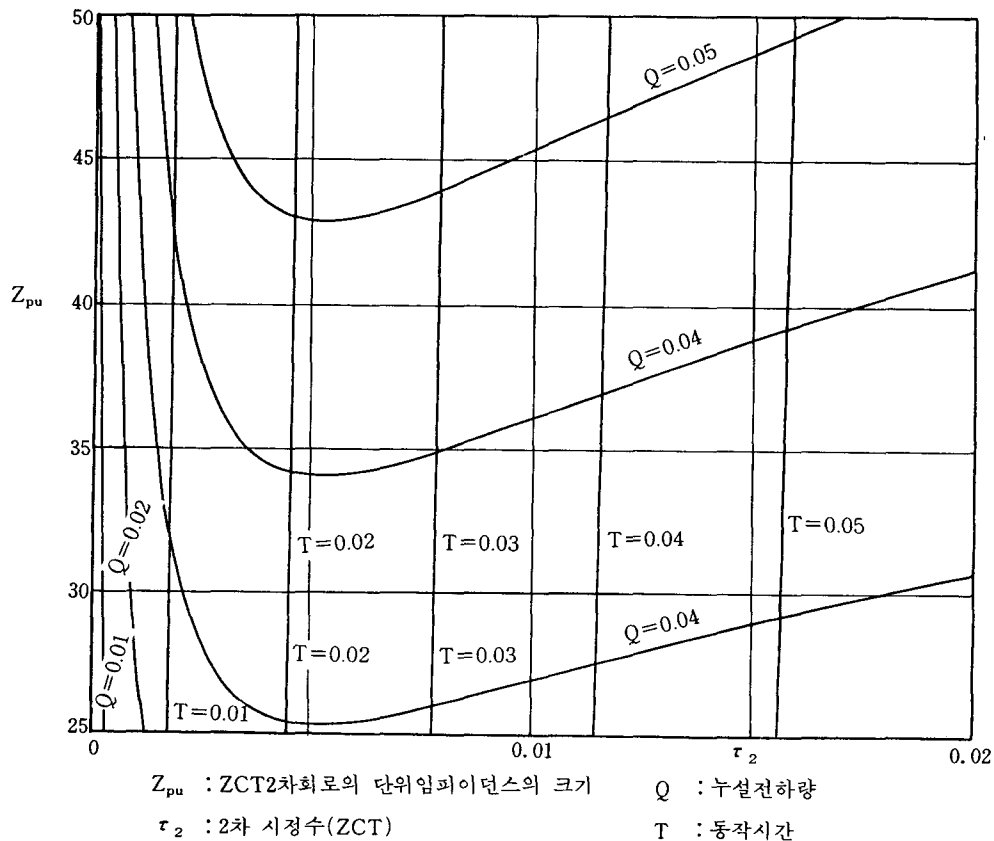


그림3-8. Range of impedance vs. operating time and leakage charge,  $\tau_1 = 0.3$ .

越式이 포함되어 있어 2個 以上の 解를 갖는 경우도 있을 수 있으므로 그의 풀이가 쉽지 않다.

式(3-14)와 式(3-15)를 풀기 위해서 그림 3-8과 같이  $T$  및  $Q$ 의 값이 一定한  $Z_{pu}$ 와  $\tau_2$ 의 曲線을 그린다. 여기서  $T$  및  $Q$ 의 範圍가 주어지면  $Z_{pu}$  및  $\tau_2$ 의 領域이 産出될 수 있게 된다.

#### 4. 結 論

低電壓配電系統의 昇壓은 地絡事故時 危險性을 增加시키게 된다. 本 研究에서는 이의 豫防策으로 既存의 保護接地方式에 漏電遮斷器를 設置하고 그 効果의인 活用을 위한 保護特性 解析을 다루었다.

1) 漏電電流의 時定數가 커질수록 遮斷器가 動作하는데 걸리는 時間이 커지고 零相變流器의 2次에 誘起되는 電流는 점점 작아지므로 直流分에 가까운 漏電電流에 대해서는 遮斷器가 動作할 수 없다.

2) 漏電電流의 時定數가 커질수록 遮斷器가 動作하기 위한 漏電電流의 最大値는 점점 커져야 하며 遮斷器가 動作하기까지 要求되는 總電荷量도 점점 커지므로 遮斷器가 動作하기 어렵게 된다.

3) 遮斷器 動作時間과 漏電總電荷量의 範圍를 定해주면 1次로 換算된 2次回路의 單位 임피던스와 2次回路의 時定數  $\tau_2$ 의 領域을 算出할 수 있어 이를 利用해 1次로 換算된 2次回路의 抵抗 및 인덕턴스의 값을 計算하므로써

遮斷器를 設計할 수 있게 하였다.

以上の 研究를 土台로 低電壓 配電系統의 地絡事故時에 계속적으로 고려될 과제로는 保護接地値와의 協調, 系統內 漏洩靜電容量의 限界値 및 漏電火災 豫防對策에 關한 研究가 切實하게 要求된다고 본다.

#### 參 考 文 獻

1. Kurt Nowak, "Zwanzig Jahre FI-Schutzschaltung Chronologie und Entwicklung varianten" pp. 7-9, aus de 16/1978.
2. A. W. Smoot, N. Magan, "Method of Calculating electrical body impedance and equipment for measuring leakage currents", p. 298, Underwriters Laboratories, USA, 1985.
3. Koepfen, "Electrounfälle und ihre Einflußgrößen aus medizinischer Sicht", Heft 6. Seite 168 bis 173, März. 1966.
4. Paul, Schnell, "Fehlerstrom-Schutzschaltung ein wirkungsfalle Schutzmaßnahme gegen Unfall und Brandgefahr", p. 2. Münster/westfalen.
5. Walter F. Hart, P. E., "A Five-part Resistor-Capacitor Network for Measurement of Voltage and Current Levels Related to Electric Shock and Burns", pp. 183-190, Electrical Shock Safety Criteria, 1985.
6. W. Holzmann, "Magnetische Werkstoffe für Summenstrom und Auslöser in Fehlerstroms Schutzichalten", pp. 2-3, VACUMSCHME, Hanau, 1976.