

전기설비 접지계통의 접지저항 및 최대접지망전류의 산정 방법

1992.7.



한국산업안전공단
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION
산업안전연구원
INDUSTRIAL SAFETY RESEARCH INSTITUTE

序 言

電氣는 우선 쓰기가 便利하고, 다른 形態의 에너지로 變換이 容易하며 遠距離 移送도 간편한 까닭에, 오늘날 工場, 事務室, 家庭 등 모든 分野에서 必須不可缺少하게 사용되고 있습니다. 그러나 電氣는 잘못 사용할 경우 매우 危險하여 人命과 財産에 커다란 災害를 誘發할 수가 있습니다. 電氣에 의한 災害를 防止하기 위하여는 올바른 使用法을 使用者들에게 弘報하는 것과 더불어 電氣設備 自體의 安全對策을 樹立하는 일이 매우 중요합니다. 여러가지 電氣 安全對策중의 하나로서 매우 有用하고 經濟的인 手段으로 接地를 들 수 있습니다.

電氣에 의한 事故의 대부분은 充電部에 사람이 接觸하여 電擊으로 死亡하거나 火傷 등의 傷害를 입는 感電事故가 代表的이라고 할 수 있는데, 이러한 感電事故는 주로 送·配電 線路에 대한 活線作業을 할 때와 電氣機器의 絶緣이 破壞되어 漏電이 일어나고 있는 外函에 人體가 接觸될 경우에 주로 發生합니다. 여기서 平常時 非充電部였던 機器·設備의 바깥 部分에 漏電이 일어나 發生하게 되는 感電事故는 接地 System을 改善하여 완벽한 接地工事を 할 경우 상당히 豫防할 수 있습니다.

이 冊子는 금년도 우리 研究院에서 遂行한 接地 관련 研究의 一次年度 結果중에서 接地抵抗의 計算과 地絡電流 및 最大接地網電流의 算定方法에 대한 事項을 記述한 것입니다. 接地에 관한 여러가지 一般的인 事項들은 別送로 펴낸 「電氣 設備·機器의 接地技術」을 參考하시기 바랍니다.

이 冊子는 電氣施設을 設計하고 工事하는 모든 事業場의 要員들 및 一般事業場에서 電氣 機器·施設을 使用하는 作業者와 安全管理者들의 技術指針書로, 그리고 우리 公團의 教育院과 各 指導院에서 教育 및 技術指導 資料로 活用될 수 있으리라 봅니다. 비록 未盡한 部分이 많더라도 아무쪼록 産業現場에서 接地工事を 施行하거나 接地設備를 補修·管理하는데 요긴하게 活用될 수 있게 되기를 바랍니다. 이 책에서 未

盡한 점들은 계속 補完해 나갈 計劃이며 이를 위해 讀者 여러분들의 아낌없는 指導
鞭撻을 바라마지 않습니다.

1992년 7월 31일

한국산업안전공단
산업안전연구원장
徐 相 學

차 례

1. 머리말	1
2. 人體와 地絡事故	3
가. 人體의 抵抗	3
나. 人體許容電流 限界	4
다. 等價事故回路	5
라. 許容電位差	10
3. 接地抵抗의 計算	14
가. 接地系の 構成要素	14
나. 大地抵抗率	16
다. 接地抵抗 計算式의 理論的 接近	18
라. 半橢圓體 接地電極의 接地抵抗	20
마. 棒型電極의 接地抵抗	21
바. 線모양 電極의 接地抵抗	23
사. 環狀電極의 接地抵抗	25
아. 띠(帶)모양 電極의 接地抵抗	26
자. 板狀電極의 接地抵抗	27
차. 網狀(Mesh) 電極의 接地抵抗	28
카. 接地棒과 結合된 網狀電極의 接地抵抗	31
4. 配電線路의 故障電流 (Fault Current) 計算	34
가. 電氣回路의 Impedance	34

나. 三相短絡電流의 計算	36
다. 線間短絡電流의 計算	37
라. 中性點 接地系統에서의 一線地絡電流의 計算	38
5. 最大接地網電流 (Maximum Grid Current)의 計算	42
가. 地絡事故의 形態와 接地網電流	42
나. 最大接地網電流 算定時 考慮할 因子	44
다. 最大接地網電流의 計算	46
6. 맺음말	48
參考文獻	49

1. 머 리 말

電氣는 다른 형태의 에너지로 變換이 용이하고 遠距離 移送도 아주 간편하여 오늘날 工場, 事務室, 家庭 등 모든 分野에서 便利하게 사용되고 있다. 그러나 電氣는 잘못 사용할 경우 매우 危險하여 人命과 財産에 큰 被害를 유발할 수 있다. 電氣에 의한 災害를 防止하기 위하여는 올바른 使用法을 사용자들에게 弘報하는 것과 더불어 電氣設備 自體의 安全對策을 樹立하는 일이 매우 중요하다.

電氣設備의 安全對策으로서 크게 MCB나 Fuse 등을 이용하여 過電流를 遮斷하는 방법과 漏電遮斷器를 이용하여 漏電되는 電流를 感知하여 電路를 遮斷하는 방법, 그리고 接地電極을 통하여 異常電流를 大地속으로 흘려보내는 방법 등으로 구분할 수 있는데 여기서는 후자와 관련하여 接地시스템을 설계하는데 있어 아주 중요한 接地抵抗의 算出과 接地網電流를 推定하는 방법에 대하여 考察해 보고자 한다. 接地는 電氣 設備/機器와 大地 사이에 確實한 電氣的 接續을 實現시키는 技術이다. 우리나라에서는 接地가 簡單하고 별로 중요하지도 않은 技術로 생각하여 研究機關이나 大學에서 學問的인 關心을 못 받고 있을 뿐만 아니라 産業現場에서조차 소홀히 다뤄지고 있다. 그러나 接地는 安全이나 機能的 側面에서 매우 중요한 역할을 하는 것으로서, 깊이있게 探究할 餘地가 많은 技術이다.

接地는 보통 强電用接地와 弱電用接地로 구분한다. 强電用接地는 人間 및 電氣 시스템/設備/機器의 安全을 確保하기 위한 이른바 安全用接地이다. 弱電用接地는 電氣/電子/通信 機器 및 시스템의 安定된 稼動을 確保하기 위한 機能用接地로서 다시 回路利用을 위한 接地, 電磁波 Noise 防止를 위한 接地, 靜電氣障害 防止를 위한 接地, 落雷災害防止를 위한 接地 등으로 분류할 수 있다. 여기서는 電氣設備에 의한 感電防止를 위한 安全用 接地에 한정하여 취급하고자 한다.

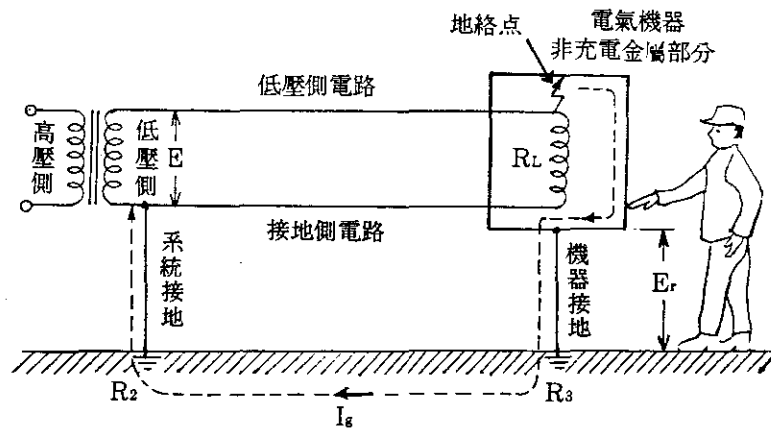


그림 1-1 地絡事故 및 感電危險防止接地의 概念圖

그림 1-1은 地絡事故의 한 形態와 이 때의 事故電流가 흐르는 經路를 나타내고 있어 接地가 왜 人體의 安全에 重要한지를 보여주고 있다. 電氣設備에는 變壓器의 2次側에 第2種 接地工事に 의한 系統接地를 하고 電氣機器의 외함에는 第3種 接地工事に 의한 機器接地를 하여 地絡事故時 電氣機器 외함에 흐르는 電流가 接觸중인 人體를 통하지 않고 바로 大地속으로 흘러들어갈 수 있도록 하여야 한다.

電氣機器중에는 접지를 할 필요가 없는 것들도 있는데 이는 그림 1-2와 같이 二重絶緣을 한 機器로서 地絡事故에 의하여 充電部가 機器表面으로 電流를 흘러 보낼 가능성이 극히 적은 경우이다.

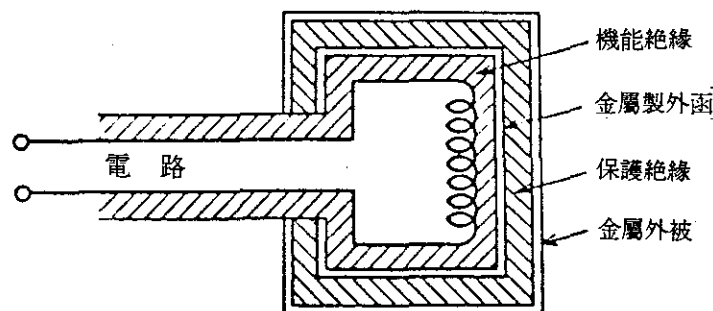


그림 1-2 二重絶緣의 概念圖

安全用接地 設計의 目的은 간단히 다음과 같이 要約될 수 있다.

- ① 正常 또는 事故狀態下에서 設備의 作動限界를 超過하고나 運轉中斷을 惹起함이 없이 電流를 大地로 흘러 보내는 手段을 提供한다.
- ② 接地施設 近處에서 作業하거나 지나가는 사람이 電擊의 危險에 露出되지 않도록 安全性을 確保한다.

2. 人體와 地絡事故

가. 人體의 抵抗

人體의 抵抗은 사람마다 다르고 같은 사람이라도 皮膚의 乾濕狀態, 가해지는 電壓의 크기 등에 따라 變化한다. 그림 2-1은 Freiburger의 人體抵抗 等價回路를 나타내고 있는데 人體內部의 抵抗과 兩端의 皮膚抵抗으로 구분하고 있다.

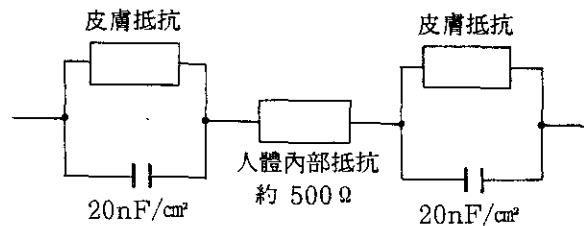


그림 2-1 人體의 等價回路

人體의 內部抵抗은 대략 300 ~ 500 Ω 이고 皮膚抵抗은 皮膚條件에 따라 다르나 보통 500 ~ 1000 Ω 으로 간주하고 있다. 여기서 물론 通電經路가 어떻게 形成되느냐에 따라 抵抗値는 달라져서, Dalziel의 실험에 의하면 成人男子의 경우 60Hz 交流電壓에서 손과 손사이는 2330 Ω, 손과 발사이에는 1130 Ω 으로 나타났다. 보통 人體抵抗의 값은 皮膚抵抗을 포함시키면 500 ~ 3000 Ω 으로 넓은 범위에 걸쳐 있다.

感電電壓이 높거나 (1KV 이상), 通電電流가 클 (5A以上) 경우, 接觸部位의 皮膚가 파괴되어 人體抵抗이 크게 감소한다. 또한, 손, 발이 젖어 있으면 낮은 電壓에서일지라도 接觸抵抗이 크게 낮아진다. 그러므로, 이 指針의 目的上 다음과 같이 假定한다.

① 손 및 발의 接觸抵抗은 0 Ω 으로 假定한다.

② 손에서 양발, 손에서 손, 그리고 발에서 발 사이의 人體抵抗을 1000 Ω 으로 한다.

$$R_B = 1000 \Omega \quad (2-1)$$

나. 人體許容電流限界 (Permissible Body Current Limit)

人體를 통하여 흐르는 50 ~ 60Hz 交流 電流의 크기 및 通電時間은 心室細動 (Ventricular Fibrillation)을 일으키는 量보다 작아야 한다.

Dalziel의 研究結果에 기초를 둘 때 우리 人間의 99.5%가 心室細動을 일으키지 않고 安全하게 전달 수 있는 通電電流의 크기 (I_B)와 시간 (t_s)은 다음 식으로 결정된다.

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad (2-2)$$

여기서 K는 比例常數로서 몸무게가 50Kg인 사람의 경우 $K_{50} = 0.116$ 이고, 70Kg인 사람은 $K_{70} = 0.157$ 이다. 따라서 人體許容電流의 限界는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_a}} \quad (\text{몸무게 } 50\text{kg인 사람}) \quad (2-3)$$

그리고

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_a}} \quad (\text{몸무게 } 70\text{kg인 사람}) \quad (2-4)$$

예컨데 몸무게가 50Kg인 사람은 1초 동안 116mA의 電流에 견딜 수 있고, 0.1초 동안은 367mA의 電流에서 견딜 수 있다.

다. 等價 事故回路

위에서 決定된 人體의 許容電流値와 回路常數値들을 사용하면 人體의 두 接觸部位間의 許容電壓을 결정하는 것이 가능하다. 우선 等價事故回路에서 사용되는 記號들을 다음과 같이 定意하자.

I_A = 事故回路를 흐르는 電流

R_A = 事故回路의 全有效抵抗

I_B = 許容 人體 電流

R_B = 人體 抵抗

安全을 위해서는 분명히 $I_A < I_B$ 가 되어야 한다.

事故回路의 저항 R_A 는 人體抵抗 R_B 와 步觸電壓 (발과 大地사이의 전압) R_F 의 函數이다. 回路分析을 용이하게 하기 위하여 발바닥을 하나의 傳導性 金屬圓板 (Disk)으로 나타내고 구두나 양말의 接觸電壓을 무시하면 R_F 및 발사이의 相互抵抗 R_{MF} 는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \quad (2-5)$$

$$R_{MF} = \frac{\rho}{2\pi d_F} \quad (2-6)$$

여기서, R_F = 한발과 大地사이의 抵抗 [Ω]

R_{MF} = 양발 사이의 相互抵抗 [Ω]

b = 발의 等價圓板半徑 (발의 面積을 同一面積의 圓의 半徑으로 나타낸 값) [m]

d_F = 양발간의 步幅距離 [m]

ρ = 大地(土壤)의 抵抗率 [Ω -m]

발의 等價圓板半徑으로는 $b = 0.08m$ (3in)의 값이 일반적으로 사용되고 있다.

이 경우

$$R_F = 3\rho \quad (2-7)$$

양발이 直列 또는 竝列로 있을 때의 발과 大地간의 抵抗은 각각 다음과 같다.

$$R_{2FS} = 2(R_F - R_{MF}) \quad (2-8)$$

$$R_{2FP} = 1/2(R_F + R_{MF}) \quad (2-9)$$

여기서,

R_{2FS} = 양발이 直列回路를 이룰 때의 발과 大地간의 抵抗

R_{2FP} = 양발이 竝列回路를 이룰 때의 발과 大地간의 抵抗.

개략적인 계산을 위해, 相互抵抗을 무시하면 ($b = 0.08m$ 로 가정)

$$R_{2FS} = 6\rho \quad (2-10)$$

$$R_{2FP} = 1.5\rho \quad (2-11)$$

발과 大地間의 接觸抵抗을 증가시키기 위하여 흔히 두께가 0.08 ~ 0.15m의 자갈층 (Layer of Crushed Rocks)을 接地網 위에 깐다. 자갈층은 裝備나 車輛의 移動性を 높이기 위해서도 사용한다. 이 경우 자갈층의 抵抗率이 자갈층 밑의 大地의 抵抗率보다 훨씬 크기 때문에 接地網電流의 극히 일부만이 자갈층으로 흐르게 된다. 다시 말하면, 자갈층의 추가로 大地와 발사이의 接觸抵抗이 크게 증가되어 地絡事故時 人體를 흐르게 되는 電流는 아주 작아지게 된다.

接地網 위에 자갈층이 있을 경우의 양발의 直列抵抗 및 竝列抵抗의 概略 計算式은 다음과 같다.

$$R_{2FS} = 6.0 C_s(h_s, K) \rho_s \quad (2-12)$$

그리고

$$R_{2FP} = 1.5 C_s(h_s, K) \rho_s \quad (2-13)$$

여기서 C_s 는 자갈층의 抵抗率에 대한 減衰指數로서 다음 식으로 계산되며, 이 식을 미리 계산하여 그 값들을 나타낸 것이 그림 2-2에 나와 있다.

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nh_s/0.08)^2}} \right] \quad (2-14)$$

여기서

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (2-15)$$

ρ_s = 자갈층의 抵抗率 [Ω -m]

ρ = 大地 [土壤]의 抵抗率 [Ω -m]

h_s = 자갈층의 두께 [m]

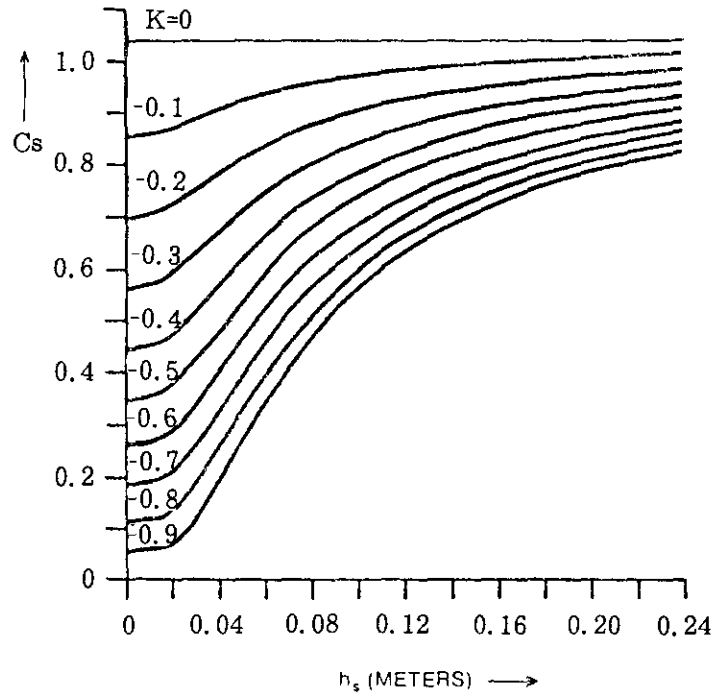
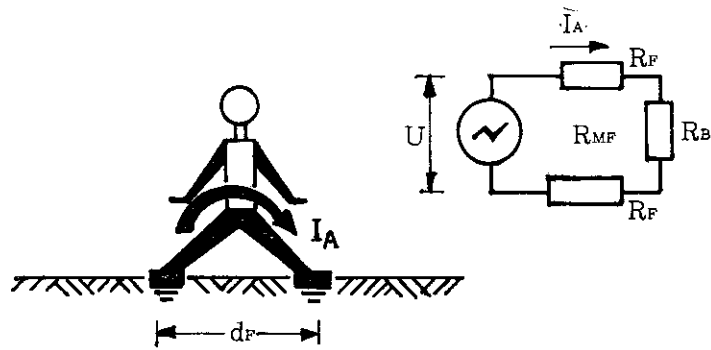


그림 2-2 자갈층의 두께와 減衰指數 C_s 와의 關係

그림 2-3은 양발 接觸時의 等價回路이다. 여기서 電位差 U 는 地表面上에 접근 가능한 두점 사이에 형성되는 最大電位差이다. 步幅電位回路에 대한 等價抵抗은 다음 식과 같이 주어진다.

$$R_A = R_B + 2 (R_F - R_{MF}) \quad (2-16)$$



d_F = 步幅距離 [m]

I_A = 事故回路의 電流 [A]

그림 2-3 步幅電壓回路

손과 두발이 接觸하는 경우에 대한 等價回路는 그림 2-4에 보여지고 있다.

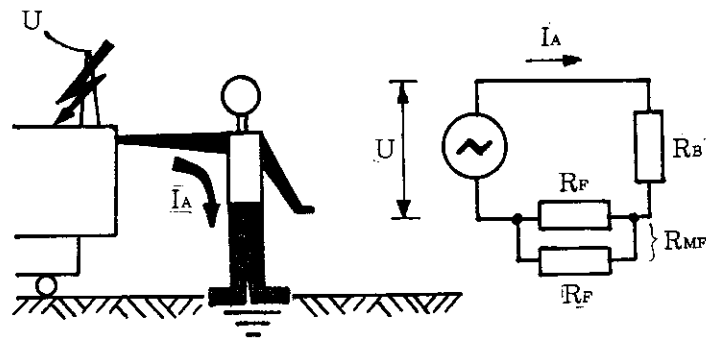


그림 2-4 接觸電壓回路

이 接觸電位回路에 대한 等價抵抗은 다음 식으로 計算한다.

$$R_A = R_B + 1/2 (R_F + R_{MF}) \quad (2-17)$$

여기서, R_b 는 皮膚抵抗을 包含하는 人體의 抵抗으로 앞에서 假定한 대로 1000Ω 으로 한다.

라. 許容電位差 (Permissible Potential Difference)

(1) 地絡事故시 일어나는 電擊의 狀況과 電壓

그림 2-5는 地絡事故중 사람과 接地物에 관계되는 네가지 경우의 基本 狀況을 나타내고 있다.

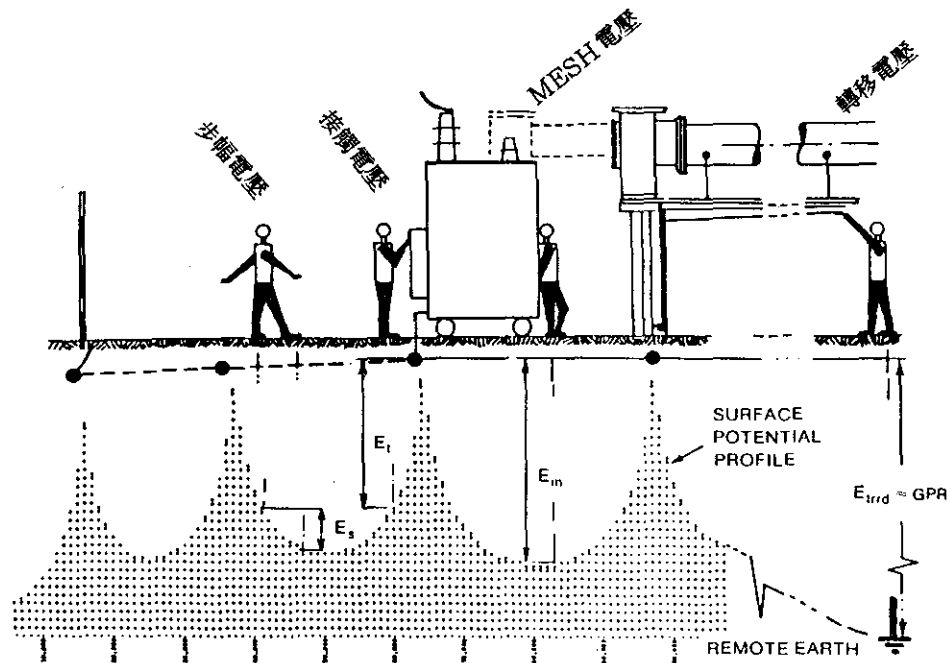


그림 2-5 基本電擊狀況과 電壓分布圖

그림 2-5에서 첫번째 경우인 발과 발사이의 接觸에 대하여는 等價事故回路가 그림 2-3에 해당하고 印加電壓 U 는 步幅電壓 E_s 와 동일하다. 동 그림에서 나머지 세 경

우는 손과 양발간의 接觸으로 그림 2-4의 等價事故回路가 적용되며, 이때의 印加電壓 U 는 각각 接觸電壓 E_t , Mesh 電壓 E_m 또는 轉移電壓 E_w 에 해당된다. 接地電位上昇(GPR)과 여기서 사용되는 제 電壓에 대한 설명을 요약하면 다음과 같다.

(가) 接地電位上昇 (GPR; Ground Potential Rise)

地絡事故時 接地網 (Grid)이 遠距離 大地에 대하여 가질 수 있는 最大의 電壓으로서 接地網의 抵抗과 이를 통하여 흐르는 接地網電流의 크기에 比例한다.

(나) 步幅電壓 (E_s ; Step Voltage)

사람이 어떤 接地物과도 接觸하지 않은 상태에서 발사이의 거리를 1m로 벌렸을 때 地表面 위에 있는 양발 사이에 나타나는 電壓을 말한다.

(다) 接觸電壓 (E_t ; Touch Voltage)

사람이 손을 接地物에 接觸하고 있는 상태에서 서있는 地表面의 電位와 GPR사이의 電位差를 말한다.

(라) Mesh 電壓 (E_m ; Mesh Voltage)

接地網내에 나타날 수 있는 最大의 接觸電壓을 말한다. 이는 接地網내의 최저 電位點과 接地機器의 接地点間의 電位差가 된다.

(마) 轉移電壓 (E_w ; Transferred Voltage)

接觸電壓의 특별한 경우로서 電壓이 變電所로 또는 變電所로부터 轉移되는 것을 말한다. 轉移電壓의 전형적인 경우는 어떤 특정 시설내에 서있는 사람이 遠距離에 接地되어 있는 導體를 接觸하거나 또는 遠距離 位置에 서있는 사람이 그 特定施設의 接地網에 연결된 導體 (즉 接地導體)를 接觸할 때 생긴다.

(2) 步幅電壓 및 接觸電壓의 最大許容基準

人體에 있어 安全性은 事故가 解消되고 該當 電力系統이 非活性化되기 전까지 臨界値에 該當하는 電擊에너지가 人體에 吸收되지 않도록 防止하는 것에 달려 있다. 어떤 境遇에 있어서도 事故回路에 대한 最大印加電壓은 다음 식들로 주어지는 限界値를 초과해서는 안된다.

(가) 步幅電壓에 있어서 最大許容限界는 다음 식으로 주어진다.

$$E_s = (R_B + R_{2FS}) I_B \quad (2-18)$$

윗식에 2.4항의 I_B 에 대한 식 등을 대입하면,

$$E_s = \{R_B + 2(R_F - R_{MF})\} \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{몸무게 50Kg인 사람의 경우}) \quad (2-19a)$$

그리고

$$E_s = \{R_B + 2(R_F - R_{MF})\} \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{몸무게 70Kg인 사람의 경우}) \quad (2-19b)$$

安全을 위해서 實際 步幅電壓은 이 最大許容 步幅電壓보다 작아야 한다.

식 (2-18)에서 $R_B = 1000 \Omega$ 과 식 (2-12)의 R_{2FS} 에 대한 概略式을 대입하면 다음과 같은 計算式을 얻을 수 있다.

$$E_{S50} = \left\{ 1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho_s \right\} \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2-20a)$$

그리고

$$E_{S70} = \left\{ 1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho_s \right\} \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2-20b)$$

(나) 接觸電壓에 있어서 最大許容限界는 다음 식과 같다.

$$E_t = (R_B + R_{2FP}) I_B \quad (2-21)$$

R_{2FP} 및 I_B 에 대한 計算式들을 대입하면,

$$E_{t50} = \{R_B + 1/2(R_F + R_{MF})\} \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2-22a)$$

그리고

$$E_{t70} = \left\{ R_B + 1/2 (R_F + R_{MF}) \right\} \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2-22b)$$

식 (2-22)에서 $R_B = 1000 \Omega$ 과 식 (2-13)의 R_{2FF} 에 대한 概略式을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$E_{t50} = \left\{ 1000 + 1.5 C_s(h_s, K) \rho_s \right\} \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2-23a)$$

그리고

$$E_{t70} = \left\{ 1000 + 1.5 C_s(h_s, K) \rho_s \right\} \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2-23b)$$

여기서,

$C_s(h_s, K)$ = 表皮層의 抵抗率에 대한 減衰指數 (식 (2-14)으로 주어지며 一般土壤인 경우는 1임.)

ρ_s = 表皮層의 抵抗率 [Ω -m]

t_s = 電擊電流가 흐르는 故障持續時間 [sec]

安全을 위해서는 實際 接觸電壓 (Mesh 電壓, 轉移電壓 포함)은 이 最大許容接觸電壓 E_t 보다 작아야 한다. 안전한 步幅 및 接觸電壓 한계가 정해진 후, 接地시스템을 발생가능한 短絡電流와 故障持續時間을 고려하여 설계되어질 수 있다. 故障持續時間은 故障이 發生되어 除去될 때까지의 時間으로서 配電線路의 경우 보통 瞬時는 15Hz 이내, 限時는 30Hz 이내로 되어 있다. 따라서 故障持續時間을 보통 1초로 보아 계산하면 별 무리가 없다.

3. 接地抵抗의 計算

가. 接地系 (Grounding System)의 構成要素

接地系를 간단하게 나타내면 그림 3-1과 같이 被接地體와 이를 大地와 接觸시켜주는 接地電極 (Ground Electrode) 그리고 被接地體와 接地電極을 연결하는 接地線으로 구성되어 있다.

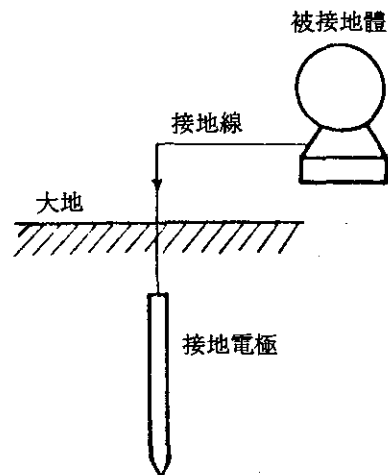


그림 3-1 接地系の 構成要素

被接地體로부터 나오는 電流는 接地線을 통하여 接地電極으로 흐르게 되고 接地電極에서는 接觸되어 있는 大地를 통하여 이를 흘려 보낸다 (그림 3-2 (a)). 이에 따라 接地電極 주위에는 電位가 생성되는데 이러한 현상을 大地 電位上昇이라 한다

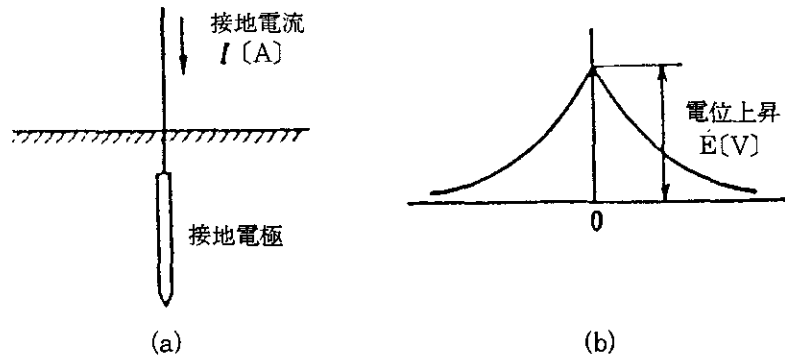


그림 3-2 接地電極을 中心으로 한 周邊大地의 電位上昇

電位上昇의 크기는 接地抵抗에 比例하는 바, 接地抵抗 R_g 를 定量的으로 정의하면 다음과 같다.

$$R_g = \frac{E}{I} \quad (3-1)$$

여기서, R_g = 接地抵抗 [Ω]

E = 接地電極의 遠距離 大地에 대한 電位上昇 [V]

I = 接地線을 통하여 들어온 接地電流 [A]

安全한 接地 System이 되기 위해서는 接地電極 周圍의 電位上昇이 낮아지도록 接地抵抗이 낮게 설계되어야 한다. 이러한 接地抵抗은 다음 세가지 抵抗으로 이루어진 것이다.

- (1) 接地線 및 接地電極 導體의 抵抗
- (2) 接地電極 表面과 接觸하고 있는 土壤사이의 接觸抵抗
- (3) 接地電極 周圍의 土壤의 抵抗

그러나 (1)과 (2)의 抵抗은 (3)의 抵抗에 比하여 무시할 수 있을 정도로 작으므로 여기서는 (3)의 抵抗만을 고려한다.

나. 大地抵抗率 (Soil Resistivity)

2장에서 발과 大地간의 接觸抵抗 등을 계산하는데 大地의 抵抗率이 필요함을 알 수 있었다. 이 大地抵抗率은 接地抵抗을 계산하는데 있어서는 필수적인 Parameter이다. 大地抵抗率은 土壤의 性質에 크게 좌우될 뿐만 아니라 電壓傾度率 (Voltage Gradient), 地絡電流의 크기, 土壤의 溫度 및 水分含量 등에도 많은 影響을 받는다. 여기서는 環境因子인 土壤의 種類, 水分含量 및 溫度에 따른 大地抵抗率의 變化를 살펴 보기로 한다.

(1) 土壤 (Soil)의 種類

土壤을 泥土 [진흙], 粘土, 砂土 [모래], 砂岩의 4가지로 크게 分類하여 이들의 抵抗率을 표 3-1에 나타냈다.

表 3-1 土壤의 種類別 抵抗率

土壤의 種類	抵抗率 [Ω -m]
泥土地/沼地	80 ~ 200
粘土地	150 ~ 300
砂土	250 ~ 500
砂岩/岩盤地帶	10,000 ~ 100,000

(2) 水分의 含量

土壤이 水分을 많이 含有하고 있으면 抵抗率이 급격히 減少한다. 예를 들면 모래가 섞인 土壤 (砂土)에 있어서 水分含量에 따른 抵抗率의 變化를 보면 표 3-2와 같다. 水分이 2%에서 28%로 增加할 경우 抵抗率은 1,800 Ω -m에서 60 Ω -m로 1/30정도가 減少한다.

表 3-2 水分含量에 따른 土壤〔砂土〕抵抗率의 變化

水分含量의 重量比〔%〕	土壤〔砂土〕의 抵抗率〔 Ω -m〕
2	1,800
4	600
6	380
8	290
10	220
12	170
16	130
20	90
24	70
28	60

土壤의 種類가 다르면 水分에 대한 抵抗率의 變化정도도 당연히 다르다.

(3) 溫度

一般的으로 金屬體는 溫度가 上昇하면 抵抗率이 增加하나 半導體, 電解液, 絶緣體는 반대로 溫度가 올라가면 抵抗率이 減少한다. 표 3-3은 약 15%의 含水率을 가진 어떤 土壤의 溫度에 따른 抵抗率의 變化를 보여주고 있다.

表 3-3 土壤의 溫度와 抵抗率

溫 度〔℃〕	抵 抗 率〔 Ω -m〕	比 率
20	72	1.0
10	99	1.4
0	130	1.9
0 (結氷)	300	4.2
-5	790	10.9
-15	3,300	45.9

抵抗率의 溫度 影響은 매우 중요하여 接地抵抗이 季節에 따라 變動하는 큰 원인이 되고 있다 (그림 3-3의 例 參照).

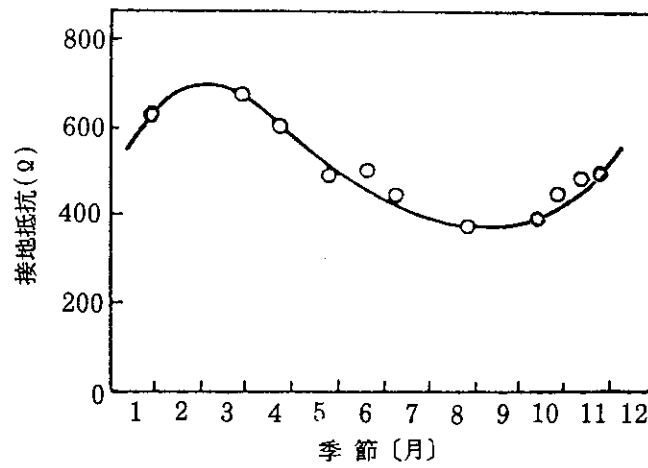


그림 3-3 接地抵抗의 季節變動 (例)

다. 接地抵抗 計算式의 理論的 接近

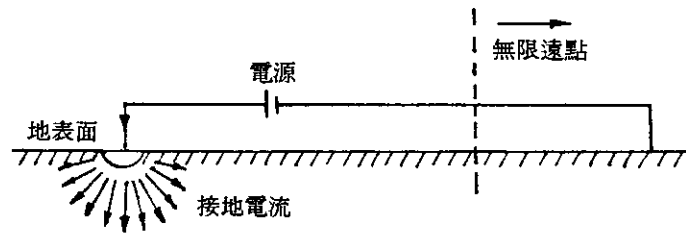


그림 3-4 接地回路의 概念的 Model

理論的 取扱을 용이하게 하기 위하여 半球狀의 接地電極을 假定하자. 그림 3-4는 半球型 接地電極의 개념적인 接地回路 Model을 나타내고 있다. 接地電極 周圍의

土壤은 抵抗率이 ρ 로 均一하고 接地電流는 電極表面으로부터 周圍大地로 放射狀으로 흘러 들어간다고 가정한다.

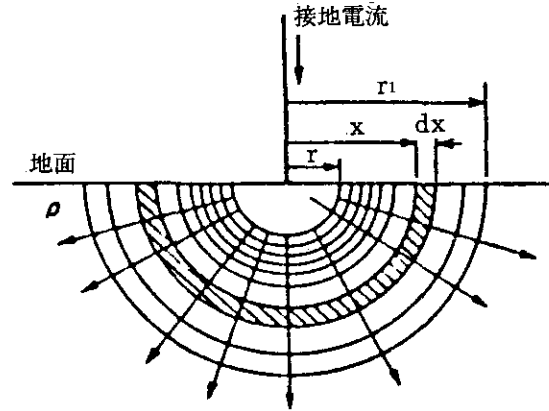


그림 3-5 半球型 接地電極

半球型 電極의 半徑을 r 이라고 하고 이 半徑의 中心으로부터 x 만큼 떨어진 距離에 두께가 dx 인 半環狀 部分의 土壤의 抵抗을 dR 이라고 하면

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2} \quad (3-2)$$

電極中心에서 r_1 만큼 떨어진 部分의 抵抗 R_1 은 다음과 같이 얻어진다.

$$R_1 = \int_r^{r_1} dR = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (3-3)$$

여기서 接地抵抗 R_g 는 接地電極으로부터 無限으로 떨어져 있는 곳까지 包含하는 全體抵抗으로서 $r_1 \rightarrow \infty$ 이 되어 $1/r_1 \rightarrow 0$ 이므로 다음과 같이 된다.

라. 半橢圓體 接地電極의 接地抵抗

半橢圓體電極의 基本 모양은 그림 3-6과 같은데, x , y , z 축 方向의 길이를 각각 a , b , c 라고 할 때, 이들 a , b , c 의 大小 關係에 따라 橢圓體의 모양이 달라져 그림 3-7과 같이 구분한다.

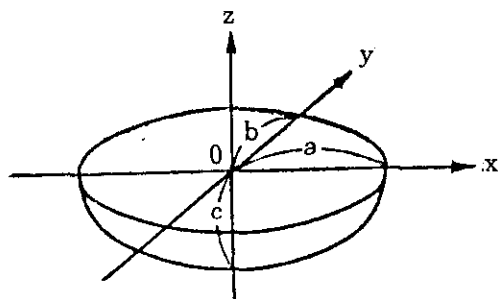


그림 3-6 半橢圓體型의 電極

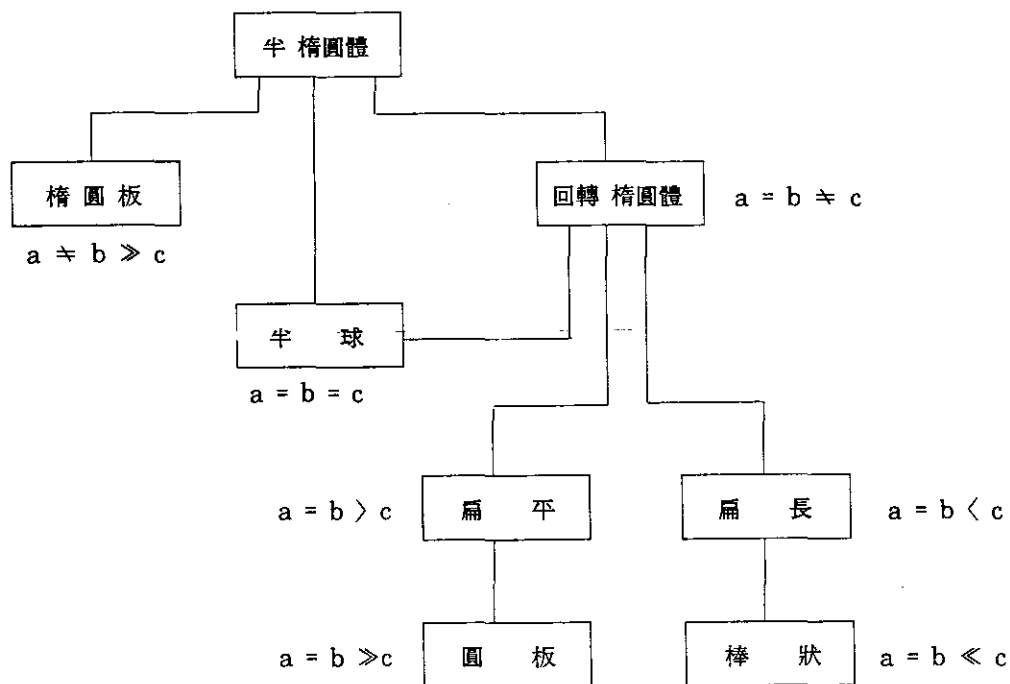


그림 3-7 半橢圓體 電極의 分類圖

이러한 여러가지 형태의 橢圓體 電極에 대한 接地抵抗의 計算式은 표 3-1과 같다.

接地抵抗은 電極의 總 面積에 크게 의존한다. 임의의 모양을 가진 電極의 接地抵抗은 간략한 계산법을 사용하여 구할 수 있다. 즉, 위 표와 같이 이론적인 解析解가 있는 電極과 等價表面積置換法을 사용하여 구한다. 예를 들면, 正四角形板은 圓板으로, 直四角形板은 橢圓板으로, 立方體는 半球로, 直六面體는 半橢圓體로 각각 바꿔 놓으면 概略的인 값을 표 3-1의 公式을 이용하여 計算할 수 있다.

마. 棒型電極의 接地抵抗

棒型電極은 半徑 r 에 比하여 길이 l 이 훨씬 큰, 막대모양의 電極을 일컫는다. 이 棒型電極은 打入한 경우와 地表面 아래에 埋設한 경우로 두 가지로 나뉘 생각할 수 있다.

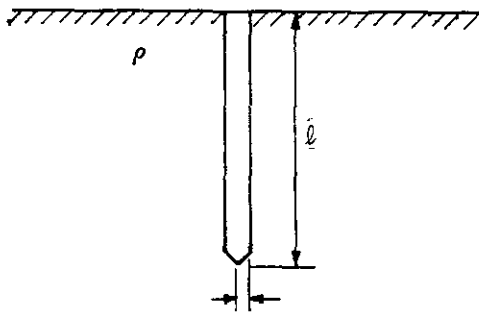


그림 3-8 打入된 棒型電極

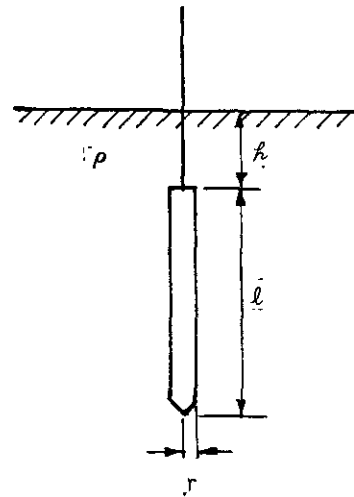


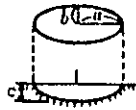
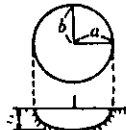
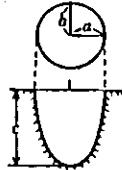
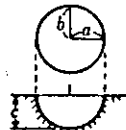
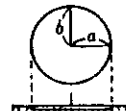
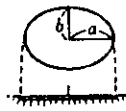
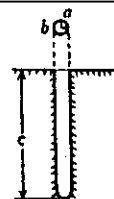
그림 3-9 埋設된 棒型電極

그림 3-9와 같이 埋設한 것은 電極으로부터 생기는 電位傾度を 緩和시키는 效果가 있다. 棒型電極의 接地抵抗을 계산하는 式中 代表的인 것으로 다음 네가지 式을 들 수 있다.

① Tagg & Ollendorff 計算式

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (3-5)$$

表 3-4 半橢圓體 電極系의 接地抵抗 計算式

電 極 形 狀 (a, b, c의 大小關係)	接 地 抵 抗 算 定 式
半橢圓體 $c < b < a$ 	$R = \frac{\rho}{2\pi\sqrt{a^2 - c^2}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$ $k = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2}} \quad \phi_0 = \sin^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2}$ (長軸=a, 短軸=b, 厚さ=c)
橢圓平轉 橢圓體 $a > b > c$ 	$R = \frac{\rho}{2\pi r} \sin^{-1} K$ $K = \sqrt{1 - \left(\frac{l}{r}\right)^2}$ (半徑(a)=r, 길이(c)=l)
橢圓長轉 橢圓體 $a = b < c$ 	$R = \frac{\rho}{4\pi l T} \ln \frac{1+T}{1-T}$ $K = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2}$ (半徑(a)=r, 길이(c)=l)
半 球 $a = b = c$ 	$R = \frac{\rho}{2\pi r}$ (半徑(a)=r)
圓板 $a = b \gg c$ 	$R = \frac{\rho}{4r}$ (半徑(a)=r)
橢圓板 $a \approx b \gg c$ 	$R = \frac{\rho}{2\pi a} \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}$ $k = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (\text{長軸}=a, \text{短軸}=b)$
棒 狀 $a = b \ll c$ 	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r}$ (半徑(a)=r, 길이(c)=l)

② Sunde & Dwight 計算式

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (3-6)$$

③ 木曾 計算式

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{l}{r} + \frac{1}{2} \ln \frac{1.5l+2h}{0.5l+2h} \right] \quad (3-7)$$

④ 馬淵. 高木 計算式

$$R_4 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l-r}{r} + \frac{1}{2} \ln \frac{1.5l+2h}{0.5l+2h} \right] \quad (3-8)$$

여기서

ρ = 大地의 抵抗率 [Ω -m]

l = 電極의 길이 [m]

r = 電極의 半徑 [m]

h = 電極의 埋設깊이 [m]

바. 線모양 電極의 接地抵抗

線모양 전극은 棒型電極을 그림 3-10과 같이 地表面 아래에 水平으로 埋設한 것으로서 埋設地線이라고도 한다. 이 地線電極의 接地抵抗은 大地抵抗率 ρ [Ω -m], 線의 길이 l [m] 및 半徑 r [m]은 물론이고 埋設깊이 h [m]에도 크게 依存한다.

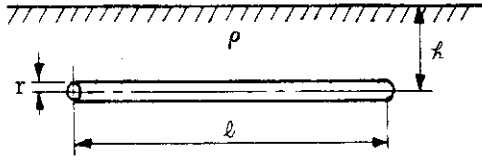


그림 3-10 선모양 電極 (埋設地線)

$h < l$, $r \ll l$ 의 條件을 滿足할 때 이 線모양 電極의 接地抵抗은 다음 式들중의 하나를 이용하여 계산이 가능하다.

① Rudenberg & Zingraff 計算式

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r} \left[1 + \frac{\ln l/2h}{\ln l/r} \right] \quad (3-9)$$

② Tagg & Dwight 計算式

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{l}{h} - 2 + \frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{8l^4} \right] \quad (3-10)$$

③ Sunde & Schwarz 計算式

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right] \quad (3-11)$$

사. 環狀電極의 接地抵抗

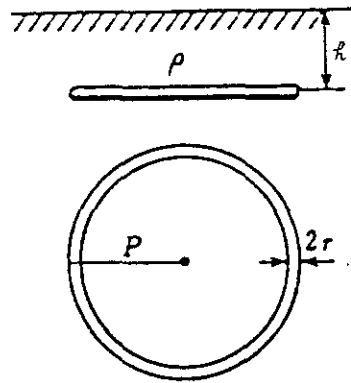


그림 3-11 環狀電極

電極은 그림 3-11과 같이 線모양 電極을 등근 고리모양으로 埋設한 것으로서 歐美各國에서 많이 사용하고 있다. 地表面 아래 h (m)에 埋設되고 線의 굵기 (斷面의 반지름 r (m)로 나타냄)와 環의 半徑 P 가 주어질 때, 이 電極의 接地抵抗은 다음 세式중의 하나를 사용하여 계산할 수 있다. 여기서 조건은 $h < 2\pi P$, $r \ll 2\pi P$ 를 만족시켜야 한다.

① Sunde 計算式

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi^2 P} \ln \frac{8P}{\sqrt{2rh}} \quad (3-12)$$

② Rudenberg 計算式

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi^2 P} \ln \frac{8P}{r} \quad (3-13)$$

③ Zingraff 計算式

$$R_3 = \frac{\rho}{4\pi^2 P} \ln \frac{8P}{r} \left[1 + \frac{\ln(4P/h)}{\ln(8P/r)} \right] \quad (3-14)$$

아. 띠(帶)모양 電極의 接地抵抗

띠(帶)모양 電極은 그림 3-12와 같은 형상으로서 띠의 폭을 a [m], 두께를 b [m], 그리고 길이를 l [m]라고 하고 埋設깊이를 h [m]라고 할 때, 보통 b 는 a 의 $1/8$ 이하이고 $a \ll l$, $b \ll l$, $h \ll l$ 의 조건을 만족한다.

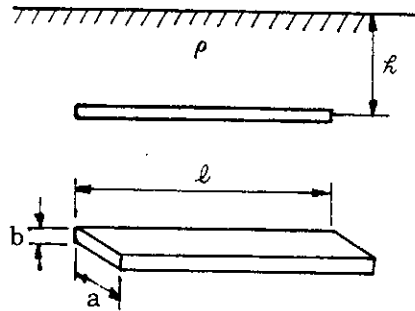


그림 3-12 띠모양 電極

띠모양 電極의 接地抵抗의 計算式으로는 다음 두 식이 사용된다.

① Tagg & Dwight 計算式

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{l}{h} - 1 + \frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{8l^4} \right] \quad (3-15)$$

② Rudenberg 計算式

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{a} \quad (3-16)$$

자. 板狀電極의 接地抵抗

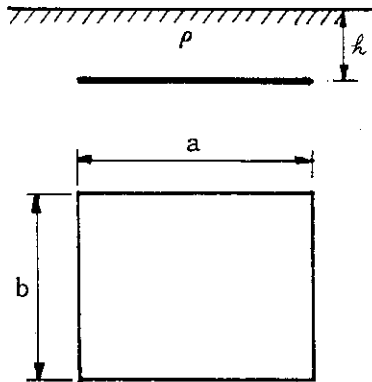


그림 3-13 板狀電極

板狀電極은 그림 3-13과 같은 모양으로 가로 a [m], 세로 b [m]의 比에 따라 正四角形 또는 直四角形이 되고 板의 두께는 무시할 수 있을 정도로 작다.

板狀電極의 接地抵抗 計算式으로는 가로와 세로의 비 a/b 와 埋設깊이 h [m]를 考慮한 McCrocklin式과 埋設깊이를 고려치 않고 同一面積의 圓板電極으로 置換하여 計算한 Tagg式이 있다.

① McCrocklin 計算式

$$R_1 = \frac{0.1\rho K_1}{b} \quad (3-17)$$

② Tagg 計算式

$$R_2 = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{ab}} \quad (3-18)$$

① 式에서 K_1 은 a , b 및 h 에 의하여 決定되는 常數로서 그림 3-14에서 구할 수 있다.

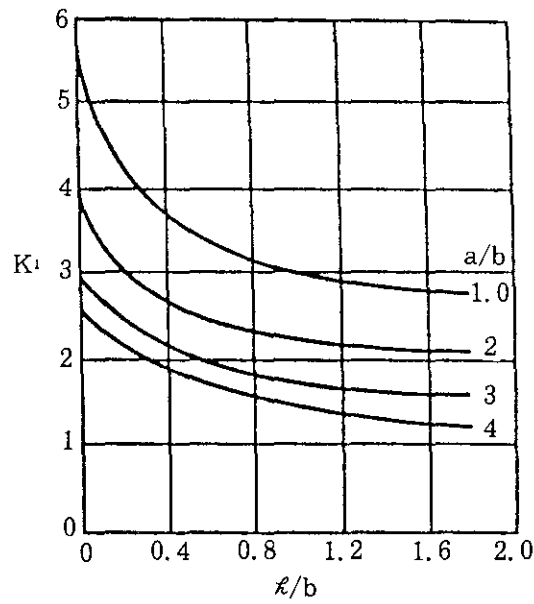


그림 3-14 McCrocklin의 係數

차. 網狀 (Mesh) 전극의 접지저항

Mesh 전극은 그림 3-15와 같이 導體線의 網으로 이루어진 전극이다. 이 전극의 접지저항은 상황에 따라 다음과 같은 세가지 계산식 중에서 선택하여 계산할 수 있다.

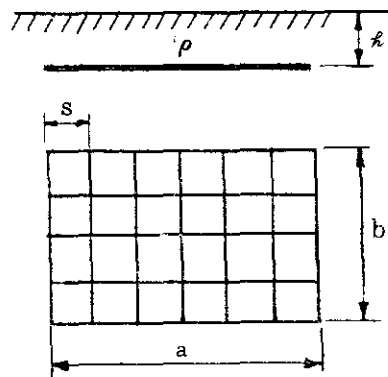


그림 3-15 網狀 (Mesh) 電極

① Laurent & Niemann 計算式

$$R_1 = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{ab}} + \frac{\rho}{L} \quad (3-19)$$

여기서,

A = 接地網 (Ground Grid)의全體面積 [m²]

L = 埋設된 導體의全體길이 [m]

식 (3-19)에서 둘째항은 導體의 數가 增加되면 L이 커져 減少하다가 極限값으로 導體數가 無限大로 늘어나면 $L \rightarrow \infty$ 이 되어 消滅된다. 이 경우는 Mesh가 金屬板의 상태로 된 경우로서 윗식은 圓板電極, 橢圓板電極 또는 板狀電極의 計算式과 일치한다. 윗식은 Mesh의 埋設깊이가 0.25m 이하일 때는 비교적 正確하게 사용될 수 있다.

② Severak 計算式

$$R_2 = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20A}} \right) \right] \quad (3-20)$$

③ Schwarz 計算式

$$R_3 = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \frac{2L}{h'} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (3-21)$$

여기서,

L = 電極 (Grid) 導體의 總길이 [m]

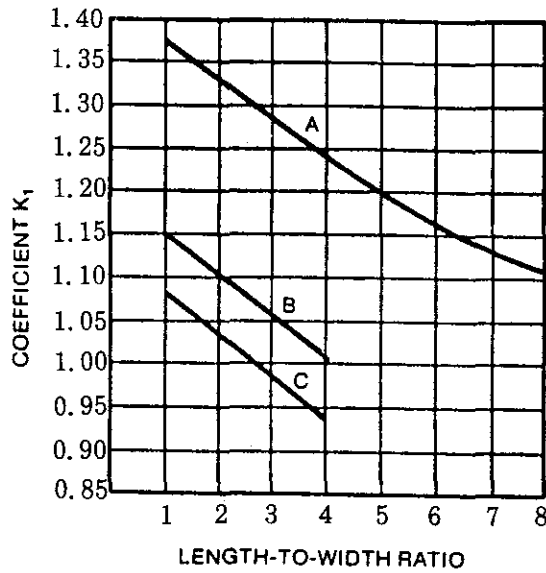
A = Grid 電極의全體面積, a·b [m²]

h = Grid 電極의 埋設깊이 [m]

$$h' = \begin{cases} \sqrt{2rh} , & \text{Grid의 埋設깊이가 } h \text{ 일 때} \\ r , & \text{Grid가 大地表面 } (h=0) \text{ 에 있을 때} \end{cases}$$

r = Grid 構成導體의 半徑 [m]

K_1, K_2 = Grid 電極의 길이, 가로, 세로, 埋設깊이 등에 따라 決定되는 常數
로서 그림 3-16에서 구할 수 있다.



Curve A - For Depth $h = 0$

$$y_A = -0.04x + 1.41$$

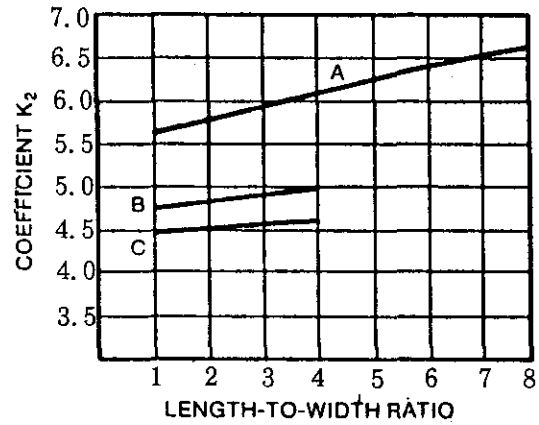
Curve B - For Depth $h = 1/10\sqrt{\text{AREA}}$

$$y_B = -0.05x + 1.20$$

Curve C - For Depth $h = 1/6\sqrt{\text{AREA}}$

$$y_C = -0.05x + 1.13$$

(a) 常數 K_1



Curve A - For Depth $h = 0$

$$y_A = 0.15x + 5.50$$

Curve B - For Depth $h = 1/10\sqrt{\text{AREA}}$

$$y_B = 0.10x + 4.68$$

Curve C - For Depth $h = 1/6\sqrt{\text{AREA}}$

$$y_C = 0.05x + 4.40$$

(b) 常數 K_2

그림 3-16 Schwarz 計算式의 常數 K_1 및 K_2

上記 ②의 Severak 計算式과의 ③Schwarz 計算式은 埋設깊이가 0.25m 以上 2.5m 以下일 때에 주로 사용된다.

카. 接地棒과 結合된 網狀電極의 接地抵抗

위의 라. ~ 차.節에서 說明한 基本 모양의 電極을 바탕으로 接地抵抗을 더욱 낮추기 위한 接地電極의 設計가 가능하다. 그 중 代表的인 것이 水平 Mesh와 垂直棒 (Rod)을 結合한 形態로서 그림 3-17에 보여지고 있다.

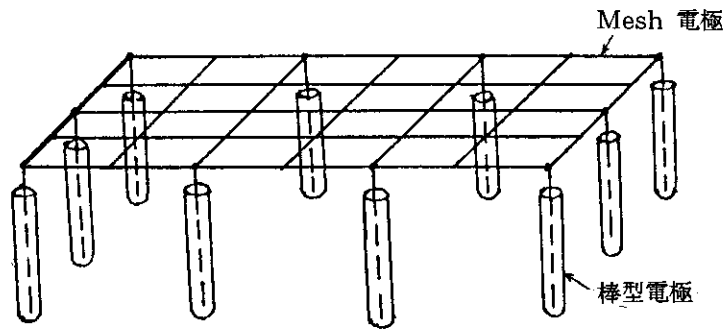


그림 3-17 垂直接地棒과 結合된 網狀電極

水平 Mesh 電極에 의한 抵抗 R_1 은 차.에서 이미 구하였고 (여기서는 차.③의 Schwarz 計算式 사용) 垂直 Rod 電極의 抵抗 R_2 는 Rod 1개에 대한 計算式인 마. ②의 Sunde & Dwight 式을 修正하여 구할 수 있다.

水平 Mesh 電極의 抵抗:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_1} \left[\ln \left(\frac{2L_1}{h'} \right) + K_1 \frac{L_1}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (3-22)$$

垂直 Rod 電極의 抵抗:

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi L_2} \left[\ln \left(\frac{4L_2}{r_2} \right) - 1 + 2K_1 \left(\frac{L_2}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (3-23)$$

그리고 Mesh 導體와 Rod 導體間의 相互抵抗 R_{12} 는 다음과 같은 式으로 구한다.

$$R_{12} = \frac{\rho_a}{\pi L_1} \left[\ln \left(\frac{2L_1}{L_2} \right) + K_1 \frac{L_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (3-24)$$

여기서 K_1 , K_2 는 電極의 幾何學的 Parameter와 關係되는 常數로서 차.의 그림 3.16에서 求할 수 있고,

ρ_1 = 埋設깊이 h 에 있는 Mesh 導體가 接觸하는 土壤의 抵抗率 [Ω -m]

ρ_2 = 깊이 H 以下の 土壤의 抵抗率 [Ω -m]

ρ_a = 接地棒을 基準으로 한 土壤의 合成 抵抗率 [Ω -m]

H = 上層 土壤의 두께 [m]

L_1 = Mesh 導體의 總길이 [m]

L_2 = 接地棒의 平均길이 [m]

h = Mesh의 埋設깊이 [m]

$h' = \begin{cases} \sqrt{2r_1 h}, & \text{Mesh 導體의 埋設깊이가 } h \text{ 일 때} \\ r_1, & \text{Mesh 導體가 地表面에 있을 때 (h=0)} \end{cases}$

A = Mesh의 面積, $a \cdot b$ [m^2]

n = 接地棒의 個數

r_1 = Mesh 導體의 半徑 [m]

r_2 = 接地棒의 半徑 [m]

a = Mesh 電極의 세로 (짧은쪽) 길이 [m]

b = Mesh 전극의 가로 (긴쪽) 길이 [m]

위의 세 식은 復層構造를 가진 大地環境에 適合하며, 이 경우 上層은 두께가 H 이고 抵抗率이 ρ_1 으로서 垂直導體棒은 傳導性이 더 나은, 抵抗率이 ρ_2 인 下層까지 뻗혀 있게 된다 ($\rho_1 > \rho_2$). 즉, 水平電極網은 抵抗率이 ρ_1 인 上層部에 埋設되나, 垂直接地棒은 일부분은 抵抗率이 ρ_1 인 上層部에, 一部分은 抵抗率이 ρ_2 인 下層部에 묻혀 있게 된다. 接地棒의 抵抗 R_2 와 相互 接地抵抗 R_{12} 를 계산하는데 있어서는 다음과 같이 정의되는 合成抵抗率 ρ_a 를 使用하여야 한다.

$$\rho_a = \frac{l_2 \rho_1 \rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho_1(l_2 + h - H)} \quad (3-25)$$

單層 構造일 경우는 물론 $\rho_a = \rho_1 = \rho_2$ 이다.

위에서 구한 R_1 , R_2 및 R_{12} 의 값으로부터 水平 Mesh와 垂直 Rod들로 된 複合電極의 接地抵抗 R_g 는 다음과 같이 구하여진다.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (3-26)$$

接地電極의 抵抗을 낮추기 위해서는 위에서와 같이 水平 Mesh와 垂直 Rod를 結合하는 方法外에 여러가지 모양의 電極들을 組合하여 多様な 형태의 複合電極으로 만들 수 있다. 이 경우에도 本節에서와 같은 方法으로 合成抵抗을 求할 수 있다.

4. 配電線路의 故障電流 (Fault Current) 計算

가. 電氣回路의 Impedance

(1) Impedance 表示方法

(가) Ohm 法

Ohm 法은 보통의 電氣的 計算에 사용하는 方法으로서 電壓을 V, 電流를 A, 電力을 KVA 그리고 Impedance를 Ω 의 單位로 표시한다. 變壓器가 없는 簡單한 回路의 電氣的 計算에는 편리하나 變壓器가 介在하여 各 部分의 電壓이 다를 때는 基準이 되는 電壓을 決定하고 그 電壓에 相當하는 Ohm 値로 換算하여야 하는 不便이 있다.

(나) % Impedance 法

% Impedance 法은 定格電流가 흐를 때 생기는 電壓降下를 相電壓의 百分率 (%)로 表示하는 方法이다. 이 % Impedance를 이용하여 短絡電流를 計算하는 方法은 매우 편리하여 이 章에서는 이 方法을 사용하기로 한다.

(다) Per Unit 法

이것은 % Impedance와 같은 概念이나 基準量을 100으로 하는 % 대신 基準量 1에 대한 比로 나타낸 것이다.

(2) % Impedance의 計算

(가) 線間電壓이 V (KV), 三相容量이 P (KVA)인 電力系統에 있어서 Impedance Z (Ω)은 % Impedance로 다음과 같이 變換될 수 있다.

먼저 Z에 흐르는 電流는 $I = P/(\sqrt{3}V)$ (A)가 되어 이 電流가 Z를 通過할 때 I·

Z [V]의 電壓降下가 일어나게 된다. 따라서 定意에 의하여 % Impedance는 이 電壓降下值 I·Z의 相電壓에 대한 百分率이므로,

$$\%Z = \frac{I Z}{\frac{V}{\sqrt{3}} \times 10^3} \times 100 \quad (\%) \quad (4-1a)$$

또는

$$\%Z = \frac{\sqrt{3} I Z}{10V} \quad (\%) \quad (4-1b)$$

(나) 電壓과 電流의 어떤 基準量을 擇하여 이를 각각 基準電壓 [KV]과 基準電流 [A]라고 할 때 基準電力 [KVA]과 基準 Impedance [Ω]는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{基準電力 [KVA]} = \text{基準電壓 [KV]} \times \text{基準電流 [A]} \quad (4-2)$$

$$\text{基準 Impedance } [\Omega] = \frac{\text{基準電壓 [KV]} \times 10^3}{\text{基準電流 [A]}} \quad (4-3)$$

여기서 Z [Ω]인 Impedance는 基準 Impedance에 대한 百分率 즉 %Z로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\%Z = \frac{Z [\Omega]}{\text{基準 Impedance } [\Omega]} \times 100 \quad (4-4)$$

(다) 三相基準電力 [KVA]과 基準線間電壓 [KV] 및 基準電流 [A]와의 關係는 다음과 같다.

$$\text{基準電流 [A]} = \frac{\text{三相基準電力 [KVA]}}{\sqrt{3} \text{ 基準線間電壓 [KV]}} \quad (4-5)$$

따라서, 基準線間電壓과 基準電力을 알 때, 式 (4-5)를 式 (4-3)에 代入하여 基準 Impedance를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{基準 Impedance } [\Omega] = \frac{(\text{基準線間電壓 (KV)})^2 \times 10^3}{\text{基準電力 (KVA)}} \quad (4-6)$$

이 경우 %Z는 다음과 같다.

$$\%Z = \frac{Z [\Omega] \times \text{三相基準電力 (KVA)}}{(\text{基準線間電壓 (KV)})^2 \times 10} [\%] \quad (4-7)$$

나. 三相短絡電流의 計算

配電系統의 同一 地點에서 三相이 短絡되는 事故 (그림 4-1)는 흔히 있으나 他 短絡事故電流의 계산에 基準이 된다.

基準電流 I_n [A]과 % Impedance를 알 때 三相短絡電流 $I_{3\phi}$ 는 다음과 같은 計算式으로 구할 수 있다.

$$I_{3\phi} = I_n \times \frac{100}{\%Z_1} [A] \quad (4-8)$$

여기서 I_n 과 $\%Z_1$ 은 각각 基準電流와 事故回路의 正相 % Impedance로서 다음과 같다.

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} V} [A] \quad (4-9)$$

$$\%Z_1 = \%Z_s + \%Z_t + \%Z_{l1} [\%] \quad (4-10)$$

여기서, P = 三相基準電力 [KVA]

V = 線間電壓 [KV]

Z_s = 電源系統의 % Impedance [%]

Z_t = 變壓器의 % Impedance [%]

$Z_u =$ 配電線路의 % Impedance [%]

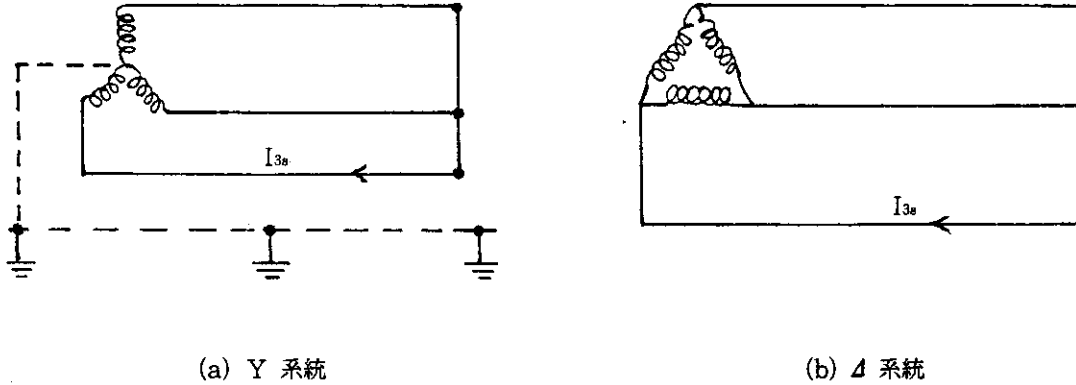


그림 4-1 三相配電系統의 短絡事故의 概念圖

다. 線間短絡電流의 計算

三相 配電系統에서 線間短絡이 일어나는 事故의 概念圖는 그림 4-2와 같다. 이때의 故障電流는 三相短絡과 같이 正相分의 電流만 흐르며 다음과 같은 計算式으로 구해진다.

$$I_{2s} = \frac{\sqrt{3} \%Z_1}{\%Z_1 + \%Z_2} I_{3s} \quad (4-11)$$

또는 식(4-8)의 I_{3s} 를 위식에서 代入하여

$$I_{2s} = \frac{100\sqrt{3}}{\%Z_1 + \%Z_2} I_n \quad (4-12)$$

여기서, $I_{2s} =$ 線間短絡電流 [A]

$I_{3s} =$ 三相短絡電流 [A]

$I_n =$ 基準電流 $(= \frac{P}{\sqrt{3} V})$ [A]

$\%Z_1 =$ 事故回路의 正相 % Impedance [%]

$\%Z_2$ = 事故回路의 逆相 % Impedance [%]

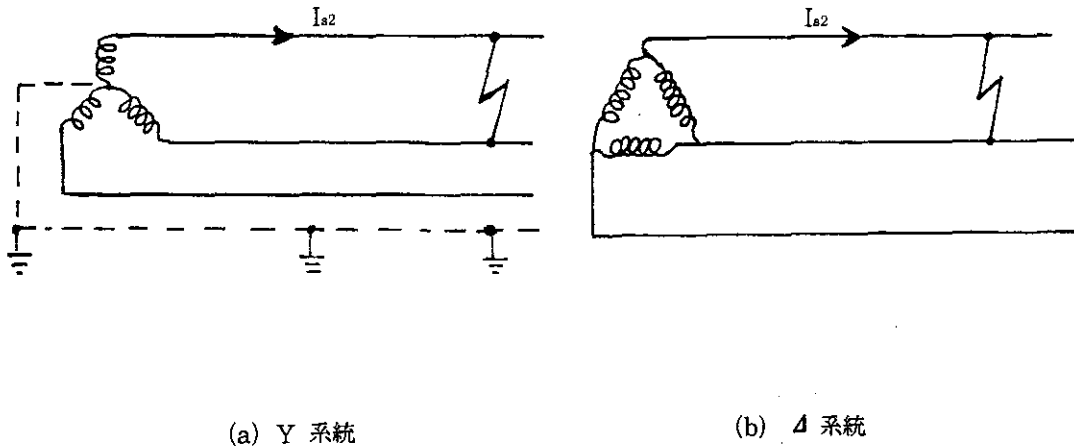


그림 4-2 線間短絡事故의 概念圖

라. 中性點接地系統에서의 一線地絡電流의 計算

第2種 接地工事의 1線地絡電流는 高壓의 境遇는 實測值 또는 “電氣設備技術基準에 관한 告示” (以下 “電技告示”라 한다.) 第10條의 計算式에 依하여 얻은 값으로 하고, 多重接地된 中性線을 가지는 高壓電路를 包含한 特別高壓의 境遇는 線路定數 등에 依하여 計算한 값으로 하여야 한다 (電技 第19條 第3項 및 第4項).

(1) 高壓 電路

電技告示 第10條에 나와 있는 第2種 接地工事의 1線地絡電流 計算式은 表 4-1과 같다.

表 4-1 1線地絡電流 計算式

電 線 路		1線地絡電流 計算式	備 考
中 性 點 非 接 地 式 高 壓 電 線	電線에 케이블以外의 것 을使用하는 電路	$I_1 = 1 + \frac{\frac{V_1}{3} \times L - 100}{150}$	右邊 2項의 값은 小數 點 以下는 切上하고 I ₁ 이 2 未滿으로 될 때 는 2로 함.
	電線에 케이블을 使用하 는 電路	$I_1 = 1 + \frac{\frac{V_1}{3} \times L' - 1}{2}$	
	電線에 케이블以外의 것 을 使用하는 電路와 電 線에 케이블을 使用하는 電路로 이루어진 複合 電路	$I_1 = 1 + \frac{\frac{V_1}{3} \times L - 100}{150} + \frac{\frac{V_1}{3} \times L' - 1}{2}$	右邊 2項및 3項의 값 은 各各의 값이 負가 되는 때는 零으로 함. I ₁ 의 값은 小數點는 切 下. I ₁ 이 2 未滿일 때 는 2로 함.
中性點 接地式 高壓電線(多重接 地된 中性點을 가지는 것은 除 外한다) 및 大地로부터 絶緣하 지 아니하고 使用하는 電氣보일 러 · 電氣爐 等を 직접 接續하 는 中性點 非接地式 高壓電路		$I_2 = \sqrt{I_1^2 + \frac{V_2^2}{3R_1^2} \times 10^6}$	小數點以下는 切上함.
中性點 리액터 接地式 高壓電路		$I_3 = \sqrt{\left(\frac{\frac{V_2}{\sqrt{3}} \times R_2}{R_2^2 + X_2^2} \times 10^3 \right)^2 + \left(I_1 - \frac{\frac{V_2}{\sqrt{3}} \times X_2}{R_2^2 + X_2^2} \times 10^3 \right)^2}$	小數點以下는 切上, I ₃ 가 2未滿이 될때는 2 로 함.

[註] I₁, I₂, I₃ : 1線地絡電流 [A]

V₁ : 電路의 公稱電壓을 1.1로 나눈 電壓 [kV]

L : 同一母線에 接續되는 高壓電路 (電線에 케이블을 使用하는 것을 除外)의 電線延長 [km]

L' : 同一母線에 接續되는 高壓電路 (電線에 케이블을 使用하는 것에 限함)의 線路延長 [km]

V_2 : 電路의 公稱電壓 [kV]

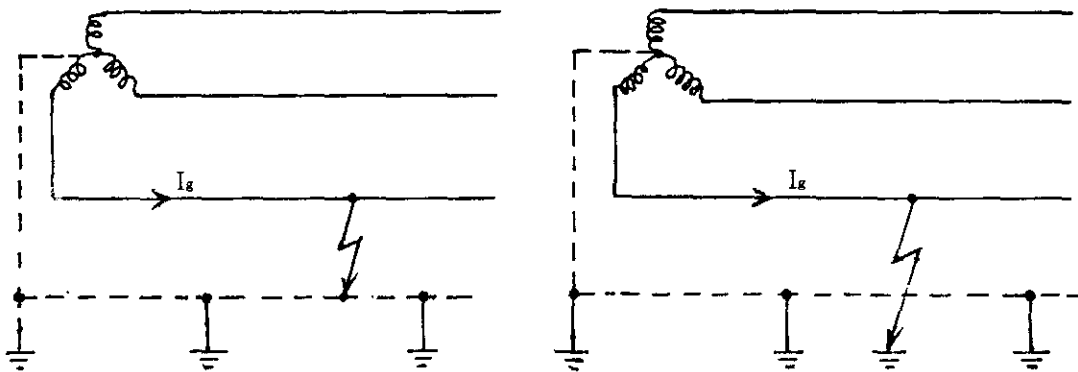
R_1 : 中性點에 使用하는 抵抗器의 電氣抵抗值 (中性點의 接地工事의 接地抵抗值을 包含하는 것으로 한다.) [Ω]

R_2 : 中性點에 使用하는 리액터의 電氣抵抗值 (中性點의 接地工事의 接地抵抗值을 包含하는 것으로 한다.) [Ω]

X_2 : 中性點에 使用하는 리액터의 誘導리액턴스值 [Ω]

(2) 特別高壓 電路 (多重接地된 中性線을 가지는 高壓電路 包含)

三相四線式의 接地系統에서 地絡事故는 多重接地된 中性線과 混觸인 경우와 地面과 直接 接觸되는 경우가 있다 (그림 4-3). 이때의 地絡事故 電流는 다음과 같은 式으로 計算된다.



(a) 中性線과의 混觸

(b) 大地와의 接觸

그림 4-3 一線短絡事故의 概念圖

$$\begin{aligned}
I_f &= \frac{3 \%Z_1}{\%Z_1 + \%Z_2 + \%Z_0 + 3\%R_g} I_{3s} \\
&= \frac{3 \times 100}{\%Z_1 + \%Z_2 + \%Z_0 + 3\%R_g} I_n \quad [A] \quad (4-13)
\end{aligned}$$

여기서,

I_f = 一線地絡事故電流 [A]

I_n = 基準電流 [A]

$\%Z_1$ = 事故回路의 正相 % Impedance [%]

$\%Z_2$ = 事故回路의 逆相 % Impedance [%]

$\%Z_0$ = 事故回路의 零相 % Impedance [%]

$\%R_g$ = 中性點의 % 接地抵抗 [%] (故障點의 抵抗値를 包含하며, 直接接地 (Solid Grounding)의 경우 故障點 抵抗이 없으면 $\%R_g = 0$ 이 된다.)

$\%Z_1$, $\%Z_2$ 및 $\%Z_0$ 는 각각 다음과 같다.

$$\%Z_1 = \%Z_s + \%Z_t + \%Z_{L1} \quad (4-14)$$

$$\%Z_2 = \%Z_1 \quad (4-15)$$

$$\%Z_0 = \%Z_0 + \%Z_{L0} \quad (4-16)$$

여기서

$\%Z_t$ = 主變壓器의 % Impedance [%]

$\%Z_s$ = 電源系統의 % Impedance [%]

$\%Z_{L1}$ = 配電線路의 正相 % Impedance [%]

$\%Z_{L0}$ = 配電線路의 零相 % Impedance [%]

$\%Z_{L1}$ 및 $\%Z_{L0}$ 는 配電關聯資料에 나와 있는 表를 利用하여 구할 수 있다. (例 : 大韓 電氣協會 發行 「配電規定」 pp. 463~467)

5. 最大接地網電流 (Maximum Grid Current)의 計算

여러가지 短絡事故에 따른 故障電流의 計算法은 앞의 4章에서 取扱하였다. 이 章에서는 故障電流가 接地網 (Ground Grid)을 통하여 周邊 大地로 흘러 들어가는 接地網 電流를 算定하는 方法을 考察하여 보고자 한다.

가. 地絡事故의 形態와 接地網電流

4章에서는 地絡事故를 크게 3相短絡, 線間短絡 및 一線地絡 事故로 분류하여 그에 따른 故障電流의 計算法을 알아 보았는데, 여기서는 그중 가장 많이 일어나는 一線地絡事故를 中性點의 接地狀態에 따라 다시 3가지로 區分하여 接地網電流를 살펴보기로 한다.

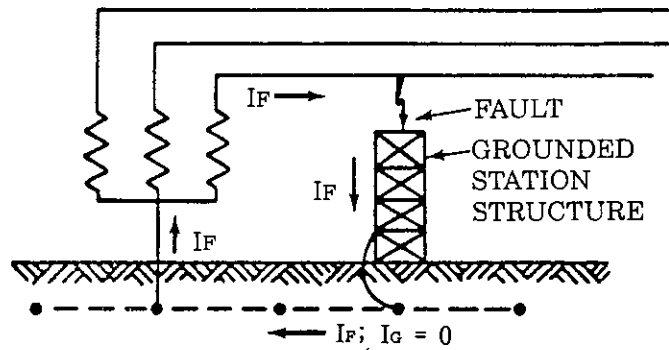


그림 5-1 局地 中性点 接地系統에서의 地絡事故

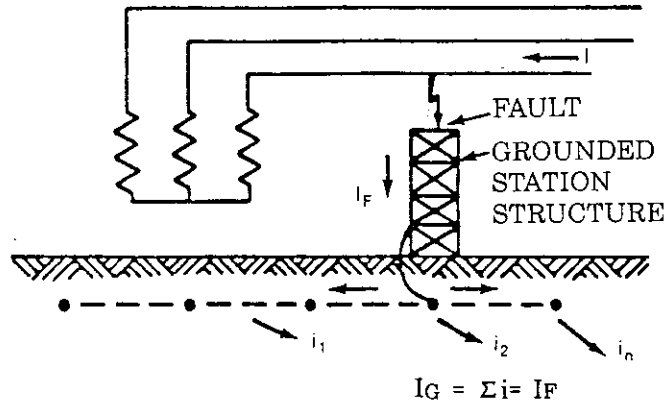


그림 5-2 局地 中性点 非接地系統에서의 地絡事故
(中性点 接地 變壓器는 他 變電所에 있음)

그림 5-1과 같이 局地 中性点 接地系統에서 地絡事故가 發生했을 때, 故障電流 I_F 는 接地網을 형성하는 金屬導體에만 흐르며 大地로 흘러 들어가는 電流 I_G 는 없다.

그림 5-2와 같이 局地 中性点 非接地系統에서 地絡事故가 發生하였을 때는 故障電流 I_F 全部가 接地網을 통하여 大地로 흘러 들어간다. 즉 $I_G = I_F$ 이다.

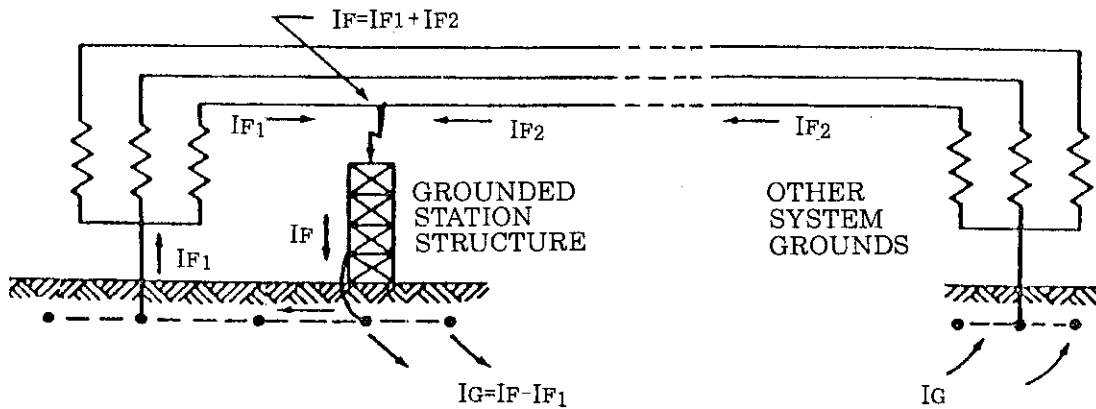


그림 5-3 局地 및 他地點 中性点 接地系統에서의 地絡事故

그림 5-3과 같이 中性点 接地個所가 여러군데 있을 경우, 한 變電所 地域에서 地絡事故가 發生하면 故障電流 I_F 의 일부 (I_{F1})는 事故地域의 中性点으로 돌아가고 나

머지가 大地로 흘러 들어가서 他 接地点으로 들어간다. 즉,

$$I_G = I_F - I_{F1} \quad (5-1)$$

나. 最大接地網電流 算定時 考慮할 因子

接地網으로부터 周邊 大地로 흘러 들어가는 接地網電流의 最大值를 구하기 위해서는 다음과 같은 여러 因子들을 考慮하여야 한다.

(1) 地絡電流 分流係數 (Current Division Factor), S_f

全體 地絡故障電流중에서 接地網 (Ground Grid)을 통하여 周邊 大地로 흘러 들어가는 電流의 比率를 나타내는 係數로서 다음 式에서 S_f 에 該當한다.

$$I_g = S_f I_f \quad (5-2)$$

여기서, I_g = 對稱 接地網電流 [A]

I_f = 對稱 地絡故障電流 (RMS 值) [A]

S_f = 電流 分流係數

이 分流計數의 計算은 接地導體와 大地 그리고 接地導體와 中性線 사이를 흐르는 電流의 等價値를 解析하는 것으로서 一般的으로 다음과 같은 要素를 고려하여야 한다.

(가) 地絡故障點의 位置

(나) 變電所 接地抵抗의 크기

(다) 接地系統과 連結된 導體

(라) 架空地線, 中性線 및 기타 歸還通路

보통 接地網을 통하여 大地로 흐르는 電流 I_g 는 地絡故障電流 I_f 의 40 ~ 60%가 되어 分流計數 S_f 를 0.4 ~ 0.6으로 適用한다.

(2) 非對稱分 校正을 爲한 減衰係數 (Decrement Factor), D_f

最大接地網電流, I_g , 는 接地網과 周邊大地사이를 흐르는 非對稱 AC 電流의 最大值이다. 實際의 地絡故障電流는 對稱交流分과 直流(DC)分の 두 部分으로 分解될 수 있는데, 여기서 DC分은 正 또는 負의 極性을 갖고 있고 一定 時間後에는 消滅된다. 이와같이 電力系統의 過渡期狀態에서 나타나는 對稱電流波와 實際電流波의 차이를 DC Offset이라고 한다. 接地網을 設計하는데 있어서 非對稱電流를 考慮하지 않을 수 없으므로 이러한 DC 電流 Offset 影響을 반영하기 위하여 減衰係數 (Decrement Factor) D_f 가 必要하다.

減衰係數 D_f 는 系統 Impedance의 X/R 比에 關係가 있고, 故障持續時間 t_f 에 따라 變하는데, 그 代表的인 값은 表 5-1에 나와있다. ($X/R = 20$ 으로 가정)

表 5-1 代表的인 減衰係數 (D_f) 值

故障持續時間 t_f (sec)	週期數 (Cycle)	減衰係數 D_f
0.008	1/2	1.65
0.1	6	1.25
0.25	15	1.10
0.5 이상	30 이상	1.0

地絡事故時間이 길 경우, DC Offset 電流의 影響이 약해져 그 時間이 30 Cycle 이상 持續될 때, D_f 는 1.0이 된다.

解析的으로 D_f 를 求하는 方法은 다음 式에 의한다.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-t_f/T_a})} \quad (5-3)$$

여기서,

t_f = 地絡故障 持續時間 [sec]

T_a = 等價系統 時間定數 [sec], 즉 60 Hz의 경우

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{120 \pi R} \quad [\text{sec}] \quad (5-4)$$

(3) 系統擴張係數, C_p

電力系統이 擴張되어 容量이 늘어나거나 接地網에 새로이 接續이 追加되면 特定位置에서 最大地絡電流는 增加한다. 系統容量의 增加는 最大豫想地絡電流 I_F 를 增加시키나, 새 接續의 追加는 最大接地網電流 I_G 를 狀況에 따라 增加시키거나 減少시킨다. 接地網電流가 減少하는 경우의 一例로는 새 送電線이 接地 또는 中性点과 같이 追加되는 경우이다.

I_G 의 增加에 대한 餘裕 (Margin)가 없으면 系統은 不安全하게 된다. 또한 接續의 繼續的인 追加는 매우 불편할 뿐더러 設置費用도 많이 든다.

I_G 의 增加를 許容하는 方法은 系統 Impedance 値를 낮추거나 단순히 地絡故障電流値에 適切한 因子 C_p ($C_p > 1$)를 곱하여 주는 것이다. 將來의 系統擴張 與否에 대한 推定은 追加가 豫想되는 모든 系統을 包含시키는 것에 의한다. 통상 C_p 는 1.0 ~ 1.5 범위내에 있다.

다. 最大接地網電流의 計算

위 나.節에서 설명한 세가지 因子를 考慮하여 最大接地網電流 (Maximum Grid Current)는 地絡故障電流로부터 다음과 같이 求할 수 있다.

$$I_G = C_p D_f S_f I_f \quad (5-5)$$

여기서,

I_G = 最大接地網電流 [A]

I_f = 對稱地絡故障電流의 RMS 值 [A]

S_f = 電流分流係數

D_f = 非對稱分 校正 減衰係數

C_p = 系統擴張係數

以上과 같이 最大接地網電流를 求하여 이 값과 接地抵抗을 곱하여 얻는 接地系의 電位上昇이 人體에 危險하지 않도록 制限하는 것이 電力系統이나 電氣設備의 接地 System을 設計하는데 있어서 가장 重要한 事項이다.

6. 맺 음 말

앞의 2章에서는 地絡事故와 관련하여 人體의 抵抗과 흐르는 電流의 許容限界 등에 대하여 記述하였고, 3章에서는 여러가지 類型別 接地電極의 抵抗을 算定하는 方法을 考察하였다. 4章에서는 配電線路의 故障電流를 計算하는 方法을 다루었고, 이에 根據하여 5章에서는 最大接地網電流를 推定하는 方法에 대하여 論議하였다.

본 指針書는 美國과 日本 등 先進國의 科學技術者들이 數十年間에 걸쳐 研究 補完한 內容을 參考로 하여 作成하였다. 그럼에도 불구하고 本 指針書에서 提示한 方法을 사용하여 얻는 計算値와 실제의 接地抵抗値간에는 여전히 많은 誤差가 存在할 수 있다. 이는 複雜한 形態의 接地電極의 抵抗値를 理論的인 計算式으로 나타내는데는 限界가 있고, 무엇보다도 計算에 必要한 各種 Parameter들이나 Data의 값을 正確히 알 수 없는데 起因한다. 그러나 이러한 誤差는 크게 念慮할 바가 못되며, 多少의 Margin만 考慮해주면 電氣安全을 위한 接地 System의 設計에 필요한 接地抵抗을 計算하는데는 充分히 使用할 수 있으리라 본다.

電氣設備를 施工하는데 있어 接地抵抗과 接地電流의 重要性을 念頭に 두지 않고, 주먹구구식으로 接地電極을 設置하는 것은 매우 危險한 일이다. 아모쪼록 本 指針書가 産業現場에서 安全한 接地 System을 設計하고 施工하는데 조금이나마 도움이 되기를 바라며, 이 指針書 自體도 앞으로 繼續하여 使用하기 便利하고 보다 正確한 內容이 될 수 있도록 補完되어져야 할 것이다.

參考 文獻

- [1] IEEE, Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1986.
- [2] IEEE, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, ANSI/IEEE Std 142-1982.
- [3] 高橋健彦, 圖解 接地技術入門, オ-ム社, 1986.
- [4] 電氣設備工事技術研究協會, 接地工事設計施工 Manual, オ-ム社, 1971.
- [5] J.G. Sverak et al., "Safe Substation Grounding - Part I", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 9, September 1981, pp. 4281~4290.
- [6] J.G. Sverak et al., "Safe Substation Grounding - Part II", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982, pp. 4006~4023.
- [7] C. F. Dalziel, "Electric Shock Hazard", IEEE Spectrum, February 1972, pp. 41~50.
- [8] 大韓電氣協會, 配電規定, 1992.

전기설비 접지시스템의 접지저항 및 최대접지망전류의 산정방법
(기연 92 - 14 -18)

발 행 일 : 1992. 7.

발 행 인 : 원 장 서 상 학

작 성 자 : 기계전기연구실장 이 관 형

발 행 처 : 한국산업안전공단
산업안전연구원

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34 - 3

전 화 : (032) 518-6484/6

(02) 742 - 0230

<비 매 품>