

## 配電用 變壓器의 合理的인 仕様과 그 設計法

## (The Optimum Specifications and Design of Distributive Transformers)

李 承 院\*  
(Sung Won Lee)

## ABSTRACT

Firstly, this study has analyzed the following factors affecting the optimum specifications and design of distributive transformers:

1. Facilities installation cost per unit power output.
2. Facilities operating & maintenance cost per unit power output.
3. Production cost per unit power output.
4. Load factor.
5. Loss factor.

Secondly, it has clarified the relations between the following factors and the specifications and design of distributive transformers:

1. No-load loss.
2. Load loss.
3. Voltage regulation.
4. Exciting current.

Finally, it has determined the method of the most economic design for the transformers using the above factors and relations, and, for optimum the illustrative purpose, suggested their optimum specifications, way of evaluation, and merits by means of a typical example.

## 1. 緒 論

配電用 變壓器의 合理的인 仕様과 設計를 爲하여 이에 關係되는 諸要素로서

1. 單位 出力當 電力施設 所要經費
2. 單位 出力當 施設 維持費
3. 單位出力 生産 價格

\* 서울 工大 教授 · 正會員  
Professor of Seoul National University

4. 負荷率  
5. 損失率  
等이 關係됨을 究明하였고 二次的으로

1. 無負荷損
2. 負荷損
3. 電壓變動率
4. 勵磁電流

의 關係를 究明하였다.

다음에는 上記와 같은 關係 結果에 따라 가장 廉價인 變壓器 設計法을 究明 하였고 그 結果로 列를 들어 新仕様 變壓器의 利點을 明示, 合理的인 配電變壓器 仕様과 設計評價法을 提示하는 바이다.

## II. 變壓器 特性의 相互 關係

電力會社에 있어서 配電部門 投資의 全 施設投資에 對한 比率은 約 40%에 達한다. 故로 이 部門에 對한 電力 事業家 및 技術者들의 關心은 至大한 것이다. 配電部門 施設中에서도 가장 重要한 位置를 차지하고 있는 것이 配電變壓器인데 이 配電變壓器가 갖추어야할 要件을 살펴 보면 設計 技術者가 技術的인 立場에서 볼때는 可能한 限 損失을 줄이어 그 效率을 增加 시킬려고 할 것이다. 이 結果는 運轉費를 減縮 시키게 된다. 이와 反面에 投資者는 될 수 있는데로 廉價인 即 材料가 덜 드는 變壓器를 要求할 것이다. 이것은 그 初期 投資를 적게 할려는 데 基因되는 것이다. 그리고 또 한편 使用者 即 需要家의 立場에서는 電壓變動率이 적고 故障이 나서 停電이 되는 일이 없는 變壓器를 要求한다.

以上과 같이 三者의 要求條件이 各己 相異할뿐 아니라 서로 相反되는 點이 있는 것이다. 即 銅과 鐵材를 節約하여 價格을 廉價로 만들면 初期投資는 減少되지만 磁束密度와 電流密度는 增大되어 損失이 增加하여 運轉費가 增加되는 것이다. 또 電壓變動率도 增大되어 需要家の 不平도 增大할 것이다. 反對로 電壓變動率이 좋고 故

障이 나지 않게 하면 技術者나 需要家は 좋아 하지만 投資者는 不滿을 갖게 될 것이다. 以上과 같이 變壓器의 特性 即 無負荷損, 負荷損, 電壓變動率, 勵磁電流等은 그 限度를 任意로 決定될 수 없는것으로서 上記 三者가 다 같이 滿足 할수 있게끔 檢討를 加해야 하는 것이다. 即

1. 運轉損失
2. 需要家에 對한 卍-비스
3. 價格
4. 過負荷能力
5. 부피와 重量

等を 檢討 相互 均衡이 맞는 限度를 決定지역야 할 것이다.

### Ⅲ. 特性에 關係되는 諸 因子의 究明

#### (A) 運轉 費用

(1) 無負荷 損失—먼저 無負荷 損失에 對해서 생각해 볼 것 같으면 이것은 配電用 變壓器의 一次側이 電源에 連結되어 있는 限(柱上變壓器와 같이) 負荷의 有無, 大小에 關係 없이 恒常 一定하며 이에 따르는 運轉費도 따라서 一定하다.

그런데 이 費用을 한 層 더 分析해 보면

- (a) 施設 維持費分
- (b) Energy 經費分

의 二部分으로 나누어 진다. 이것은 energy 自體가 經費가 되는 (b)項 外에 그 energy 自體도 變壓器의 負荷部分임에는 틀림이 없기 때문에 이를 爲하여 換言하면 이 損失을 供給하기 爲하여 그 容量의 一部가 割點되고 있다고 봐야 하므로 이 部分을 維持하기 爲한 (a)項의 施設 維持費가 所要되는 것이다. 今 無負荷損(Kw of no load loss)를 (I), KVA 當 施設 初期投資費(demand charge)를(G), 施設 維持投資率(capitarization rate)을(R)라고 하면 無負荷損의 施設 維持費分은

$$= (I) \times (G) \times (R) / \text{年} \dots\dots\dots(1)$$

無負荷損의 energy 經費部分은

$$= (I) \times (8760) \times (B) / \text{年} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 8760은 一年을 時間으로 換算한 것이고 (B)는 KWH 當의 電力價格이다. 故로 總 無負荷損은

$$\text{Cost of no load loss} = (I)(G)(R) + (I)(8760)(B) \dots\dots(3)$$

(2) 負荷 損失—無負荷損과는 달리 이 損失은 負荷의 自乘에 따라 變化하며 이것 역시 energy 經費와 그 損失을 擔當하는 만큼의 施設 容量에 對한 維持費로 나누어서 考慮해야 한다.

#### (a) Energy 經費分

지금

$$\text{負荷係數} = \frac{\text{平均負荷}}{\text{尖頭負荷}} = (F_1)$$

라고 하면

$$\text{尖頭負荷} = \frac{\text{平均負荷}}{F_1}$$

임으로 100% 負荷時의 負荷損을 (L)라 하면 尖頭負荷損은

$$\left(\frac{100}{F_1}\right)^2 (L) \dots\dots\dots(4)$$

이것은 負荷의 自乘에 比例하여 變化하므로

$$\text{損失係數} = \frac{\text{平均損失}}{\text{尖頭損失}} = (F_2)$$

라고 하면

$$\begin{aligned} \text{平均損失} &= (F_2)(\text{尖頭損失}) \\ &= (F_2) \times \left(\frac{1}{F_1}\right)^2 \times (L) \text{ KW} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

故로 負荷損의 年間 energy 經費分은

$$= (F_2) \times \left(\frac{1}{F_1}\right)^2 \times (L) \times (8760) \times (B) \dots\dots\dots(6)$$

#### (b) 施設 維持費分

負荷損의 施設 維持費分은 尖頭負荷時 損失을 供給하는데 所要되는 容量에 해당하는 維持費가 된다. 그런데 한 系統內의 모든 變壓器가 同時에 尖頭負荷를 負擔하는 것은 아님으로 尖頭負荷 分擔率을 (F3)라고 하며 이 費用은

$$\left(\frac{100}{F_1}\right)^2 \times (L) \times (G) \times (R) \times (F_3) \dots\dots\dots(7)$$

故로 100% 負荷의 경우의 負荷損 費用은

$$\begin{aligned} &= (F_2) \times \left(\frac{1}{F_1}\right)^2 \times (L) \times (8760) \times (B) + \left(\frac{100}{F_1}\right)^2 \\ &\quad \times (L) \times (G) \times (R) \times (F_3) \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

이것은 100% 負荷인 경우 이므로 80%, 60% 負荷의 경우에는 이에 各各 (0.8)², (0.6)²을 곱해야 한다.

(3) 電壓變動率 費用—以上 두가지 運轉費 外에 또 하나 있는 것이 電壓變動率 費用(cost of regulation)이라고 부를 수 있는 것이 있다. 配電用 變壓器의 負荷가 1/3을 超過하게 되면 電壓降下가 感得되게 되는데 電壓이 떨어져 가면 같은 出力을 내기 爲해서는 電流가 그에 反比例해서 增加해야 하기 때문에 損失이 增加한다. 그래서 이 해당 損失 만큼 需要家の 電氣料金を 減해주어야 되는 것이다. 이 때의 電力損失은 電壓降下 1%에 對해서 대체로 KWH 電氣量의 1%의 1/2이 된다. 故로 지금 減料를 每 KWH 當(S), 力率(F4)라고 하면 電壓變動率 費用은

$$\begin{aligned} &= (N) \times (F_4) \times (8760) \times (S) \\ &\quad \times \left(\frac{P^2}{N^2}\right) \times (F_2) \times \left(\frac{D}{100}\right) \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

여기서 F4는 力率, N는 KVA로 表示된 容量, P는 peak KVA, D는 %로 表示된 電壓變動率이다.

(4) 勵磁電流——無負荷損, 負荷損, 電壓變動率損, 以外에 勵磁電流損이라는 것을 생각할 수 있다. 이것은 無負荷損과 같이 負荷에는 關係 없는 恒常一定한 損失이다. 그러나 다음에 實例를 들어 說明되는 바와 같이 極히 적은 損失이다. 例로서 25 KVA 變壓器를 들어 보면 變壓器의 勵磁電流를 2%라고 하면  $25 \times 0.02 = 0.5$  KVAR의 capacitor 만 있으면 能히 補償되는데 지금 1 KVAR 當 1200원 이라 하고 capitalization rate 를 15%라고 가정하면 이에 必要되는 施設 維持費는

$$(0.5) \times (1200) \times (0.15) = 90 \text{원/年} \dots\dots\dots(10)$$

으로서 極히 小額임을 알 수 있다. 故로 本 研究에서는 이 損失은 考慮 對象에서 除外했다.

(5) Reactance 電壓降下 費用——또 한가지 생각할 수 있는 것은 變壓器의 impedance 中の reactance 分에 供給되는 reactive volt ampere 에 對한 費用인데 이것 역시 極小해서 本 研究에서는 考慮치 않기로 했다.

이것도 25 KVA 變壓器를 例로 들어 考察해 보면 지금 이 變壓器의 電壓變動率이 1.7%, 負荷損이 315 W 라고 하면 1分率 抵抗 電壓降下는

$$\frac{0.315}{25} = 0.0126 \text{ per unit}$$

Per unit reactance drop 은

$$\sqrt{(0.017)^2 - (0.0126)^2} = 0.0113 \text{ per unit}$$

故로 定格 負荷에서는 이 reactive volt ampere 는

$$25 \times 1.13 = 0.282 \text{ KVAR}$$

의 capacitance 만 가지면 能히 補償이 된다. 그런데 이 reactance 電壓降下에 必要한 費用은 負荷損과 한가지로 負荷의 自乘에 比例하는 故로 尖頭負荷時에 所要되는 capacitance 는

$$\left(\frac{100}{F_1}\right)^2 \times (0.282)$$

여기서 만일  $F_1 = 0.35$ 라고 假定하면

$$\left(\frac{100}{0.35}\right)^2 \times (0.282) = 0.806 \text{ KVAR}$$

그런데 前述한 바와 같이 全變壓器가 同時에 peak load 가 되는 것은 않니가 여기에 peck responsibility factor 를 곱해야 한다. 지금 이것을 60%라고 가정하면

$$\left(\frac{100}{0.35}\right)^2 \times (0.282) \times (0.6) = 0.484 \text{ KVAR}$$

이것도 前項에서 假定한 대로 1 KVAR 當 1200원 이라 하고 하면 이에 所要되는 施設 維持費는

$$(0.484) \times (1200) \times (0.15) = 82.28 \text{원} \dots\dots\dots(11)$$

極히 少額임을 알 수 있다.

(6) 全 維持費——以上 5項目中 後二者는 極히 少額임으로 이를 無視하고 나머지 全 損失을 綜合해 보면 두 種數로 分類 綜合할 수가 있다. 그 하나는 負荷의 變動에 無關한 不變損, 또 하나는 負荷와 더불어 變化하는 可變

損이다.

(a) 不變損

$$1. \text{ 施設 初期投資費} = (G) \times (R) \dots\dots\dots(12)$$

$$2. \text{ 無負荷損} = (I) \times (G) \times (R) + (I) \times (8760) \times (B) \dots\dots\dots(13)$$

(b) 可變損

$$1. \text{ 負荷損} = (L) \times (G) \times (R) \times (F_3) \times \left(\frac{P^2}{N^2}\right) + (L) \times \left(\frac{P^2}{N^2}\right) \times (F_2) \times (8760) \times (B) \dots\dots\dots(14)$$

2. 電壓變動率損

$$= (N) \times (F_4) \times (8760) \times (S) \times \left(\frac{P^2}{N^2}\right) \times (F_2) \times \left(\frac{D}{100}\right) \dots\dots\dots(15)$$

(c) 全 運轉費

$$= \{(G) \times (R) + (I) \times (G) \times (R) + (I) \times (8760) \times (B)\} + \{(L) \times (G) \times (R) \times (F_3) \times \left(\frac{1}{N^2}\right) + (L) \times \left(\frac{1}{N^2}\right) \times (F_2) \times (8760) \times (B) + (N) \times (F_4) \times (8760) \times (S) \times \left(\frac{1}{N^2}\right) \times (F_2) \times \left(\frac{D}{100}\right)\} P^2 \dots\dots\dots(16)$$

(d) 負荷變動 全壽命 全運轉費

지금 系統의 年間 負荷 增加率이  $\alpha\%$ 라고 하고 이 變壓器를 어떤 初期 負荷 부터 始作하여  $n$ 年間 使用하면 그리고 前 (c) 項의 第一項을 A, 第二項을 B 라 하면 全壽命 期間 全運轉費는

$$= nA + B \{P^2 [1 + (1 + \alpha)^2 + (1 + \alpha)^4 + \dots + (1 + \alpha)^{2(n-1)}]\} \dots\dots\dots(17)$$

以上 考察한 結果 우리는 變壓器에 對해서 이 全壽命 全運轉費가 最小 되도록 考慮해야 되는 것이다. 即 이것이 最小가 되도록 (I), (L), (D)를 決定지으면 理想的인 變壓器의 仕樣이 될 것이다.

#### IV. 配電用 變壓器의 經濟的인 設計

前述한 바와 같이 變壓器를 設備할 경우 電力會社는 投下資本(變壓器 價格)의 償却利拂 및 運轉資本(保守 및 損失價格)을 考慮하여 그 設置 系統의 條件 및 長期 收支에 關한 檢討를 하여 가장 經濟的인 變壓器의 特性을 定하는 方法에 關해서 論 하었는데 여기서는 그 特性에 맞추어 가장 經濟的인 變壓器의 寸數를 決定짓는 設計法을 究明하고자 하는 바이다.

即 周波數, 定格電壓, 定格出力 以外에 上記와 같은 關係를 갖는 鐵損(I), 및 銅損(V)이 決定되었을 때 그 價格의 最小가 되기 爲한 條件을 究明해 보기로 한다.

例로서 그림 1 과 같은 單  
 相內鐵型인 경우 鐵損, 銅  
 損 및 變壓器 容量間의 關係  
 를 求해 보자. 지금 鐵心과  
 繼鐵의 斷面積이 同一한 경  
 우에 鐵心의 平均周長을  
 $2l_i$ , 捲線의 平均周長을  $2l_c$   
 라고 하면

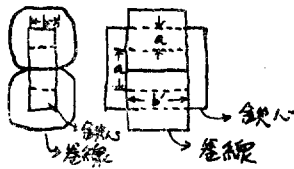


그림 1.

$$2l_i = 2(a' + b') + 4a = 2(a' + b' + ka)$$

$$2l_c = 2(a + b) + 2\pi a' / 4 = 2(a + b + k'a')$$

여기서 各種 變壓器의  $k$  및  $k'$  는 表 1 과 같다.

表 1.

單相變壓器의 構造	$k$	$k'$
內鐵型 變壓器	2	$\pi/4$
內鐵型 變壓器	1	$\pi/2$
內鐵型 捲鐵心 變壓器	$\pi/2$	$\pi/4$
外鐵型 捲鐵心 變壓器	$\pi/4$	$\pi/2$
內鐵型 片脚捲線 變壓器	2	$\pi/2$
內鐵型 片脚捲線鐵心 變壓器	$\pi/2$	$\pi/2$
內鐵型 板狀片脚捲線 變壓器	2	2
內鐵型 板狀捲線 變壓器	2	1

지금 이  $k, k'$  들로서 鐵 및 銅量의 一般式을 求하면  
 鐵心 體積은

$$V_i = 2ab(a' + b' + ka) \text{ (cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(18)$$

銅 捲線의 體積은

$$V_c = 2a'b'(a + b + k'a') \text{ (cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(19)$$

鐵心 重量은

$$W_i = 2g_i f_i a b (a' + b' + ka) \times 10^{-3} \text{ (kg)} \dots\dots\dots(20)$$

銅 重量은

$$W_c = 2g_c f_c a' b' (a + b + k'a') \times 10^{-3} \text{ (kg)} \dots\dots\dots(21)$$

여기서  $g_i, g_c$  는 各各 鐵과 銅의 比重이고  $f_i, f_c$  는 鐵과 銅의 占積率이다. 그런데 鐵損 ( $I$ )와 銅損( $L$ )는 各各

$$(I) = k_1 g_i f_i V_i B^2 \text{ (W)} \dots\dots\dots(22)$$

$$(L) = \rho f_c V_c A^2 \times 10^4 \text{ (W)} \dots\dots\dots(23)$$

그리고 變壓器의 誘起電壓  $E(V)$  및 定格電流  $I(A)$ 는 捲回數를  $N$  라고 할 것 같으면 各各

$$E = 4.44 f N B f_i a b \times 10^{-8} \text{ (V)} \dots\dots\dots(24)$$

$$I = \frac{1}{2N} A f_c a' b' \times 10^2 \text{ (A)} \dots\dots\dots(25)$$

따라서 變壓器 容量 ( $N$ ) ( $KVA$ )는

$$(N) = 2.22 f f_i f_c a b a' b' \times \sqrt{\frac{(I)(L)}{k_1 g_i f_i V_i \rho f_c V_c}} \times 10^{11} \dots\dots\dots(26)$$

따라서

$$\frac{a b a' b'}{(a + b + k'a')(a' + b' + ka)} = \frac{8.1 \times 10^{21} k_1 \rho g_i (N^2)}{f^2 f_i f_c (I)(L)}$$

$$= k_2 \frac{(N^2)}{(I)(L)} = K_1 \dots\dots\dots(27)$$

그런데 變壓器 價格 ( $M$ )는 鐵 및 銅의 單位體積 價格을 各各  $m_i, m_c$  單位重量當 價格을  $C_i, C_c$  라고 할 것 같으면  
 $(M) = m_i V_i + m_c V_c$

$$= (C_i f_i g_i V_i + C_c f_c g_c V_c) \times 10^{-3}$$

$$= 2m_i a b (a' + b' + ka) + 2m_c a' b' (a + b + k'a') \dots\dots\dots(28)$$

이 變壓器 價値 ( $M$ )의 最小値는  $d(M) = 0$ 를 計算함으로써 求할 수 있다.

$$d(M) = \frac{\partial M}{\partial a} da + \frac{\partial M}{\partial b} db + \frac{\partial M}{\partial a'} da' + \frac{\partial M}{\partial b'} db' = 0$$

$$dK_1 = \frac{\partial K_1}{\partial a} da + \frac{\partial K_1}{\partial b} db + \frac{\partial K_1}{\partial a'} da' + \frac{\partial K_1}{\partial b'} db' = 0$$

故로

$$\frac{\partial M / \partial a}{\partial K_1 / \partial a} = \frac{\partial M / \partial b}{\partial K_1 / \partial b} = \frac{\partial M / \partial a'}{\partial K_1 / \partial a'} = \frac{\partial M / \partial b'}{\partial K_1 / \partial b'} \dots\dots\dots(29)$$

이 式으로 부터  $b/a, a'/a, b'/a$  가 求해 진다.

지금 前述한  $l_i, l_c$ , 外에

$$2l_i = (a' + ka) \text{ 繼鐵 平均周長}$$

$$2l_c = (a + k'a') \text{ 捲線端 接續長}$$

또  $M_c, M_i$  外에

$$M_E = 2m_c a' b' (a + k'a') \text{ 捲線端 接續의 價格}$$

$$M_Y = 2m_i a b (a' + ka) \text{ 繼鐵 價格}$$

이라 하고 (27), (28) 式을 微分해서 (29)式에 代入할 것 같으면

$$\frac{M_i + M_i k a / l_i + M_c a / l_c}{l_i l_c - a l_i - k a l_c} = \frac{M_i + M_c b / l}{l_i l_c - b l_i}$$

$$= \frac{M_i a / l_i + M_c + M_c k' a' / l_c}{l_i l_c - k' a' l_i - a' l_c} = \frac{M_i b' / l_i + M_c}{l_i l_c - b' l_c}$$

$$= \frac{3M}{2l_i l_c} \dots\dots\dots(30)$$

여기서 最終項은 前四項의 分子 分母의 和이다.

이 第5項과 2, 4項으로 부터

$$\frac{M - M_E}{M} = \frac{3M_E}{2M_c}, \frac{M - M_Y}{M} = \frac{3M_Y}{2M_i} \dots\dots\dots(31)$$

지금 여기서

$$\frac{M_i}{M} = \frac{1}{2} + y, \frac{M_c}{M} = \frac{1}{2} - y \dots\dots\dots(32)$$

$$\text{但 } 0 \leq y \leq \frac{1}{2}$$

라고 할 것 같으면 (30)式으로 부터

$$\frac{M_i}{M_Y} = 2 + y, \frac{M_c}{M_E} = 2 - y \dots\dots\dots(33)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_i}{M_Y} + \frac{M_c}{M_E} &= 4 \\ \frac{M}{M - M_Y} + \frac{M}{M - M_E} &= \frac{8}{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(34)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{b'}{a'+ka} &= 1+y, & \frac{b}{(a+k'a')} &= 1-y \\ \frac{b'}{a+k'a'} + \frac{b'}{a'+ka} &= 2 \\ \frac{M_i}{M_c} &= \frac{m_o a(1-y)(2+y)}{m_c a'(1+y)(2-y)} = \frac{1+2y}{1-2y} \end{aligned} \right\} \dots\dots(35)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} \beta &= a'/a & m_o &= m_i/m_c \\ Y &= \frac{(1-y)(2+y)(1-2y)}{(1+y)(2-y)(1+2y)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(36)$$

라고 하면  $\beta = m_o Y$ 가 되며 (29)식의 第1項과 第5項을 (32), (35), (36)식을 써서  $y, \beta$ 로 표시해 가지고  $\beta$ 를求하면

$$\beta = Z + \sqrt{Z^2 + \frac{k}{k'} \frac{1+y}{1-y}} = m_o Y \dots\dots(37)$$

여기서

$$Z = \frac{1+kk'}{2(1-y)k'}$$

即  $y$ 를 假定하면 (37)式으로 부터  $\beta$ 가 定해지고 또 (36)式에서  $Y$ 가 決定된다. 따라서 (35)式으로 부터  $b/a, b'/a$ 가 決定되고 (27)式에서  $a$ 가 定해진다. 反對로  $m_c$ 가 주어지면  $y, \beta, a$ 를 求할 수가 있게 되고 이것으로부터 모든 寸數가 求해진다. 저금 單相 內鐵型 變壓器 即  $k=2, k'=\pi/4$ 의 경우를 보면 (36), (37)式으로 부터

$$m_o = \frac{(1-y)(2+y)(1-2y)}{(1+y)(2-y)(1+2y)} = \frac{\left(1 + \frac{\pi}{2}\right)y}{2(1-y)\pi/4} + \sqrt{\left\{\frac{\left(1 + \frac{\pi}{2}\right)y}{2(1-y)\pi/4}\right\}^2 + \frac{8(1+y)}{\pi(1-y)}}$$

가 되어  $m_o$ 와  $y$ 와의 關係曲線을 그릴 수가 있다.

그림 2는 이 曲線으로 서  $m_o$ 와 寸數와의 關係가 그림 3이다. 다음에 주어진 鐵損과 銅損을 變化시킨 경우 및  $m_o$ 가 變化한 경우에 關해서 檢討해 보면

(a)  $(L)$ 를 一定히 하고  $(I)$ 를 變化시키면 그림 4와 같이 되어 鐵損을 增加시키면 鐵量이 減少되어 價格은 싸지니  $B$ 가 커서  $I_o$ 가 增加한다.

(b)  $(I) \times (L)$ 를 一定히 하고  $(L)/(I)$ 를 變化시킨 경우  $m_i$ 가 주어지면 各部의 寸數가 定해져서 (27), (28)식이 各기  $a^2, a^3$ 에 比例 함으로

$$M = k^3 \{(I) \times (L)\}^{-\frac{3}{2}} \dots\dots(38)$$

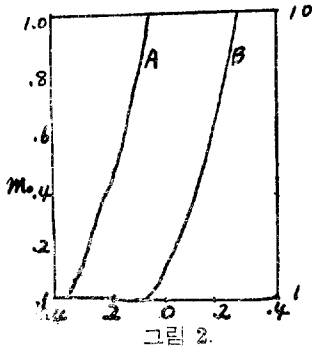


그림 2.

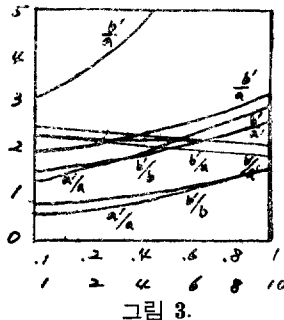


그림 3.

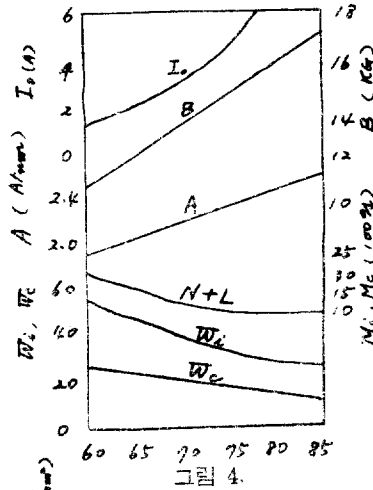


그림 4.

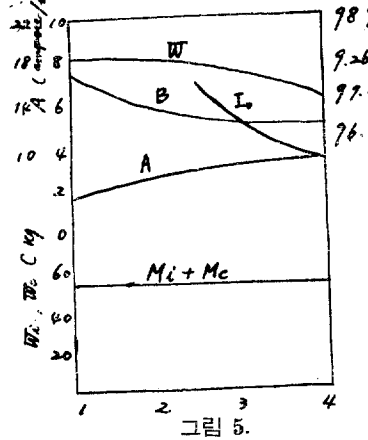


그림 5.

가 되어 價格은 鐵損과 銅損의 積의 3/2乘에 反比例하고 鐵損과 銅損의 比에는 無關係하다.

鐵損과 銅損의 比는 단지 負荷의 크기에 對한 最高 效率點을 變化시키는 것과 前述한 바와 같이 損失電力料金에만 關係가 있지 價格에는 全然 無關係를 注意해야 한다. 그림 5는 이 關係를 表示한 것이다.  $(L)/(I)$ 가 적을수록  $B, I_o$ 가 增大할 수 있다.  $(c)\{(I)+(L)\}$ 를 一定히 하고  $(L)/(I)$ 를 變化시킨 경우는 (38)式으로 價格이 주어질

으로  $(L)=(I)$ 가 될때 價格이 가장 싸게 된다. 그림 6은 이 關係를 表示한 것이다.

(d)  $m_c$  即 硅素鋼板 單價 및 銅線 單價가 여러가지로 變化한 경우로서 一般적으로 硅素鋼板의 價格 變動은 적고 銅은 그 價格 變動이 심하다. 그리고 銅損은 그 種類에 따라서도 價格 差異가 많다.  $M_c$ 의 變化에 對한 것이 그림 7이다.

$m_o$ 가 커지면 即 銅과 鐵의 單價가 接近할 수록 鐵量을 減하고 銅量을 增加시키면 最小 價格의 變壓器를 얻을 수 있음을 表示하고 있다. 銅量이 增加함으로 銅損值를 保持하려면 電流密度가 적어지고 反對로 鐵量이 減少하기

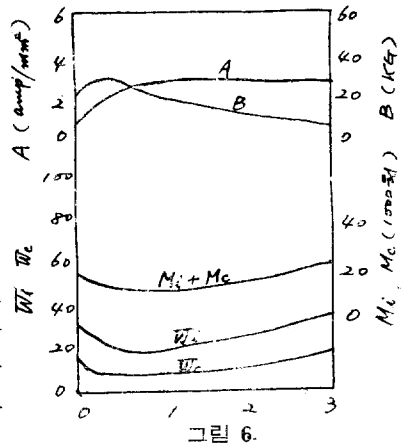


그림 6.

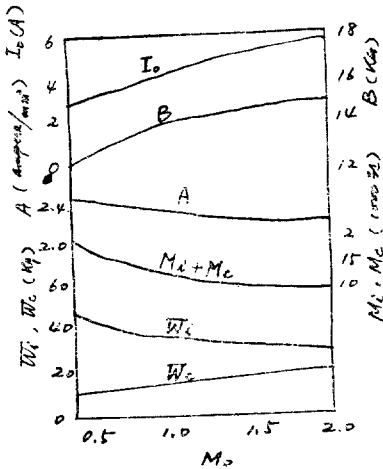


그림 7.

V. 其他 條件

A. 變壓器의 過負荷 能力

過去數十年에 걸친 研究 發展으로 말미암아 柱上變壓器의 溫度上昇 限界는 變壓器 設計上의 制限 條件이 못되게 되어 버렸다.

그림 8은 15 KVA 變壓器의 過負荷 溫度上昇 曲線인데 倍의 負荷에서 도 溫度上昇 限界點 以下임을 볼 수 있다. 이와 같이 過負荷 自體는 制限 (溫度上昇에 對한)이 되지 못하나 過負荷로 因하여 電壓降下가 增大하게 되고 損失費가 增加하게 되어 이들에 依한 制限을 받게되는 것이다.

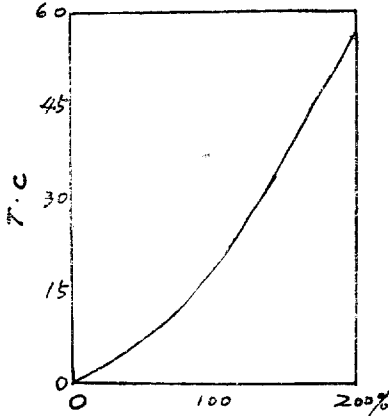


그림 8.

大體적으로 負荷가 倍가 되면 電壓降下도 倍가 되고 無負荷損은 一定하지만 負下損이 電流의 自乘에 比例하기 때문이다. 故로 電壓降下를 적게 하고 損失費만 적게 할 수 있다면 變壓器를 過負荷 시킬 수 있을 것이다. 이와 같은 觀點에서 變壓器가 設計 되었을 때 또 하나 考慮해야 할 點은 溫度上昇 限度에 餘裕를 보지 않은 變壓器가 됨으로 이에 對한 對策이 講究 되어야 할 것이다.

B. 絕緣材料의 發達

配電變壓器에 쓰여진 絕緣材料는 有機絕緣材料인데 從來에는 天然材料를 使用하여 왔었으나 近來에 와서는

때문에 B, I0는 增加하게 된다. mo가 變化하면 따라서 y가 變化하고 變壓器寸數 및 磁束密度, 電流密度가 決定된다.

合成樹脂類가 研究 發展되어 폴리비닐 호루말, 포지유라 단 樹脂等에 依한 에나멜 絕緣電線 등이 研究 發展되어 從來의 A種 以上の 溫度에서 使用할 수 있음이 確認되고 있다. 實驗 結果 이것은 從前의 A種 絕緣材料 보다 最高溫度가 15°C 더 높게 許容됨이 判明되었다. 따라서 捲線의 溫度는 25% 가량 더 높게 取할 수 있게 된다.

C. 鐵材와 損失

硅素鋼板은 그 溫度가 上昇함에 따라 損失이 減少한다.

그림 9은 鐵損과 溫度와의 關係曲線으로서 75°C때와 85°C때는 그 損失이 約 5% 차이가 남을 볼 수가 있다. 이는 變壓器의 動作溫度를 上昇시킴으로서 無負荷損을 減縮 시킬 수 있음을 보여 주고 있다.

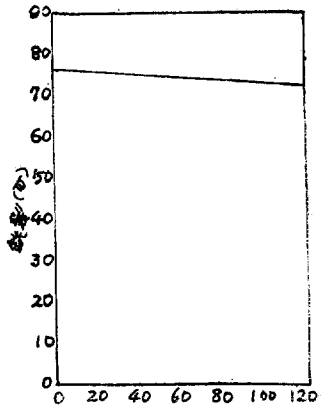


그림 9.

D. 溫度上昇과 冷却 裝置

變壓器 捲線 制限 溫度를 上昇시키면 損失이 一定한 限 冷却裝置를 節約할 수 있어 變壓器 自體를 廉價로 할 수 있거나 이 경비를 鋼과 鐵에 配當함으로써 損失을 減縮 시킬 수 있을 것이다.

E. 冷却油

變壓器油도 많은 研究의 結果 그 flash point가 大端히 上昇되고 있다.

以上 V項의 諸條件을 檢討한 結果를 綜合하면 現 變壓器의 溫度上昇 限度를 上昇시키고 또 그 負荷를 增加 시켜도 無妨함을 알 수가 있다. 이미 電動機에 關해서는 더 許容한 I. E. C. E種 電動機의 規格이 諸定되어 있는 터이다. 本 研究에서는 變壓器의 溫度上昇 限度를 10°C 上昇 시키고 그 負荷를 200%까지 增加시키기로 한다.

VI. 우리나라 配電系統의 現況

A. 損失係數 및 利用率

韓國電力의 配電 變壓器 損失係數는 表2와 같으며

表 2. 變壓器 損失係數

種別	地域	서울	京畿	忠南	備考
動力	小都市	—	—	0.19	
	大都市	0.178	—	—	
從量燈	小都市	—	0.40	—	
	農村	—	—	0.22	
定額燈	小都市	—	0.23	—	
	農村	—	—	0.16	

利用率은 表 3 과 같다.

表 3. 電燈用 變壓器의 利用率

%	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	總平何值
地域	30.	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
農村	1	1	1	5	2	1	3	3	--	--	64
小都市	--	2	--	--	3	3	3	4	--	1	77
大都市	1	--	--	1	1	4	2	1	1	--	73
計	2	3	1	6	6	10	8	8	1	1	73

韓電으로서는 配電用 變壓器의 損失係數 및 利用率을 全體에 對해서

損失係數=0.23

利用率=0.73

을 通用하고 있다.

B. 韓電系統 投資 諸係數

1. System Investment

部 門	價 格
Steam	6.622.637.416. <sup>72</sup>
Hydro	4.466.768.859. <sup>67</sup>
Diesel	776.919.667. <sup>21</sup>
Transmission	4.475.057.767. <sup>82</sup>
Distribution	6.641.024.603. <sup>29</sup>
total	22.982.408.314. <sup>71</sup>

2. System Facilities

種 別	容 量
Steam	353.919 KVA
Hydro	160.350 KVA
Diesel	49.620 KVA
total	563.889 KVA

3. Demand Charge

22.982.408.314.<sup>71</sup> ÷ 563.889 = 40.758

4. Cost of Energy=1.32

5. Load factor=65%

6. Capitalization rate

이에 對한 韓電 發表가 없어 이것은 大略 15%로 보기로 한다.

Ⅶ. 新 仕樣 變壓器 數值 計算法

A. (I)/(L)의 決定

固定負荷에 對한 年間 運轉費는 (16)式으로 表示 되고 過負荷 全壽命 期間中의 全 運轉費는 年間 負荷增加率을 α%라고 表示했을 때 (17)式으로 表示되는데 지금 計算을 簡單히 하기 爲하여 25 KVA 變壓器에 對해서 그 壽命이 25年이고 年間 負荷增加率도 年 1 KVA 로 一定하게 보

면 全壽命 期間 全運轉費는 (16), (17)式으로 부터  
 = 25{(G) × (R) + (I) × (G) × (R) + (I) × (8760) × (B)}  
 + {(L) × (G) × (R) × (F<sub>3</sub>) × (1/N<sup>2</sup>) + (L) × (1/N<sup>2</sup>)  
 × (F<sub>2</sub>) × (8760) × (B) + (N) × (F<sub>4</sub>) × (8760) × (S)  
 × (1/N<sup>2</sup>) × (F<sub>2</sub>) × (1/100)}{25<sup>2</sup> + (25+1)<sup>2</sup> + .....  
 + (25+24<sup>2</sup>)}

여기에 韓電 系統 諸值(VI 項值)를 代入 固定運轉費와 可變運轉費가 같게 해서 全運轉費가 最小가 되는 (I)와 (L)의 比를 求하면

(I)/(L)=0.69

가 된다.

B. (I)/(L)=0.69 에 對해서 第Ⅱ項의 方法에

依한 25 KVA 變壓器 寸數 決定法

지금 어떤 冷間 壓延 硅素鋼板 單位重量당 單價가 C<sub>g</sub> = 130원/lb, 銅單價 C<sub>c</sub> = 350원/lb 라고 할 것 같으면 IV 項 (d)에 論한바에 依하여 그림 7로 부터 磁束密度, 電流密度가 各各 B = 17,000 lines/in<sup>2</sup>, A = 1,500 Amp/in<sup>2</sup> 가 되어 그 寸數가 다음과 같이 된다.

Flux density B = 17,000 gauss

W<sub>c</sub> = 1.30 × 1.12 = 1.45 W/lb

Current density 1500 Amp/in<sup>2</sup>

W<sub>k</sub> = 2.58 × (234.5 + 85/234.5 + 75) × 1500<sup>2</sup> × 1.1 × 10<sup>-6</sup> = 6.59 w/lb

損失比 0.69

重量比

G<sub>c</sub>/G<sub>k</sub> = 6.59/1.45 × 0.69 = 3.14

Out put constant C = 0.8

Core section area

A<sub>c</sub> = 0.8√(25 × 3.14 × 10<sup>11</sup> / (109.650 × 1500 × 60)) = 22.55 in<sup>2</sup>

a = √(22.55 / (1.5 × 0.95)) = 3.99 4.00 로 함

b = 4.00 × 1.5 = 6.00 in

補正 鐵心 斷面積

A<sub>rk</sub> = (4 × 6 - 0.25 × 0.5 × 4) × 0.95 = 22.3 in<sup>2</sup>

(단 여기서 네귀에서 0.25 × 0.5의 귀땀을 하였다)

Total flux

φ<sub>t</sub> = 109.650 × 22.3 = 2440 Kilo line

低壓捲數

t<sub>l</sub> = (210 × 108) / (4.44 × 60 × 2440 × 10<sup>8</sup>) = 32.3 32로 함

t<sub>k</sub> = 32 × 6300 / 210 = 960

電流도

I<sub>k</sub> = 25 × 10<sup>3</sup> / 6300 = 3.97 Amp

I<sub>l</sub> = 25 × 10<sup>3</sup> / 210 = 119 Amp

銅 斷面積

S<sub>ck</sub> = 3.97 / 1500 = 0.00265 in<sup>2</sup>

$$S_{cI}=119/1500=0.0793 \text{ in}^2$$

$$V/T=210/32=6.56 \text{ volt}$$

$$h_w w_w = \frac{2 \times 0.0793 \times 32}{0.30} = 16.9 \text{ in}^2$$

$h_w/w_w$  를 2.5 로 하면

$$h_w = \sqrt{2.5 \times 16.9} = 6.5 \text{ in}$$

$$w_w = 6.5 \times 1/2.5 = 2.6 \text{ in}$$

따라서

Mean length of flux path 는

$$L_{av} = 2[6.5 + 2.6] + 2\pi = 24.5 \text{ in}$$

鐵量은

$$G_c = 22.3 \times 24.5 \times 0.272 = 149 \text{ lb}$$

捲線의 平均 一回長은

$$L_{av} = 2[4.0 + 6.0 + 2.6 \times 2] = 30.4 \text{ in}$$

銅量은

$$G_k = 2 \times 960 \times 30.4 \times 0.00265 \times 0.321 = 49.7 \text{ lb}$$

따라서

重量比는

$$G_c/G_k = 149/49.7 = 149/49.7 = 3.00$$

捲線 設計

低壓은 分割 交叉形式으로

[ $0.144 \times 0.289 = 0.0408 \text{ in}^2$ ]의 銅線을 두개 높이 방향으로 para 로 감는다.

Coil 의 높이는 절연 size 가  $0.165 \times 0.307$  이니까  
 $0.307 \times 2 \times (8+1) = 5.53 \text{ in}$

이것을 2층씩 고압권선의 안쪽에 감는다.

Coil 의 depth 는

$$0.165 \times 2 + 0.012 \times 2 = 0.354$$

Core 와 secondary 는 1/8" press board 로 절연하고 secondary 와 primary winding 간에는 1/8" press board 와 1/2" spacer 를 넣어 냉각한다. Spacer 는 물론 window 에는 넣지 않는다.

高壓 捲線

$$0.057 \text{ D (bare)} \rightarrow 0.0607 \text{ (insulated)} \rightarrow 0.00255 \text{ in}^2$$

한층에 45회식 2 section 으로 나누어 감고 그 사이를 1/2" 이격 시키면

Coil 의 높이는

$$0.0607 \times 45 \times 2 + 0.5 = 5.96 \text{ in}$$

Coil 의 두께는

$$0.0607 \times 11 + 0.012 \times 10 = 0.79 \text{ in}$$

고압권선과 밖의 저압권선 사이엔 3/16" press board 와 1" space 를 넣고 고압권선의 5 층과 6 층 사이에 1/4" duct former 를 window 양쪽에 넣는다. Yoke 와의 사이엔 1/16" press 로 권선을 보호한다. 창구내에서의 coil 의 총 두께는  $1/8" + 0.354 + 1/8" + 0.79 + 3/16" + 0.354 + 1/4" + 1/16" = 2.25$  即 window size 는  $h_w = 6.5$ ,  $w_w = 2.25 \text{ in}$  가 된다.

## 運轉特性

Total flux

$$\phi_t = \frac{6300 \times 10^8}{4.44 \times 60 \times 960} = 2.465 \text{ kilo line}$$

Flux density

$$B = 2.645 \times 10^3 / 22.3 = 110.000 \text{ line/in}^2$$

Main length of flux path

$$2 \times [6.5 + 2.25] + 2\pi = 23.8$$

Gross core weight 는

$$G_c = 22.3 \times 23.8 \times 0.272 = 145 \text{ lb}$$

捲線의 電流密度

$$A_t = 119 / 0.0816 = 1460 \text{ Amp/in}^2$$

$$A_h = 3.97 / 0.00255 = 1560 \text{ Amp/in}^2$$

平均 一回長은

$$L_{av} = 2[4.0 + 6.0 + 2.25 \times 2] = 29.0 \text{ in}$$

各 捲線의 銅量은

$$G_t = 32 \times 0.0816 \times 29 \times 0.321 = 24.3 \text{ lb}$$

$$G_h = 960 \times 0.00255 \times 29 \times 0.321 = 22.8 \text{ lb}$$

$$G_k = G_t + G_h = 47.1 \text{ lb}$$

重量比는

$$G_c/G_k = 145/47.1 = 3.08$$

Output const. 는

$$C = \frac{22.3}{\sqrt{\frac{25 \times 3.08 \times 10^8}{110.000 \times 1500 \times 60}}} = 0.80$$

Copper space factor

$$f_s = \frac{32 \times 0.0816 + 960 \times 0.00255}{2.25 \times 6.5} = 0.35$$

Core loss

$$W = 1.45 \times 145 = 210 \text{ Watt}$$

$I^2R$  stray load loss

$$W_{kt} = 2.66 \times 1460^2 \times 1.1 \times 24.3 = 151 \text{ watt}$$

$$W_{kh} = 2.66 \times 1560^2 \times 1.1 \times 228 = 162 \text{ watt}$$

$$W_k = 151 + 162 = 313 \text{ watt}$$

損失比는

$$W_c/W_k = \frac{210}{313} = 0.67$$

Resistance at 85° C

$$R_t = 151/119^2 = 0.0107 \Omega$$

$$R_h = 162/3.97^2 = 10.3 \Omega$$

Equivalent resistance

$$R_t = 313/3.97^2 = 19.8 \Omega$$

% resistance voltage drop

$$P_r = 19.8 \times 3.97/6300 = 1.25 [\%]$$

% reactance drop

$$P_x = \frac{21.5 \times 60 \times 960^2 \times 3.97}{6300 \times 5.96 \times 10^6} \left( \frac{0.79 + 0.708}{6} + 0.125 \right) \times 29.0 = 1.00 \%$$



% impedance drop

$$P_z = \sqrt{1.25^2 + 1.00^2} = 1.6\%$$

短絡 持續電流

$$I_s = 3.97 \times 100 / 1.6 = 248 \text{ Amp}$$

Voltage regulation at  $p.f. = 1.00$

$$\epsilon_{1.00} = 1.25 + \frac{1.00^2}{200} = 1.26\%$$

Voltage regulation at  $p.f. = 0.80$

$$\epsilon_{0.80} = 1.25 \times 0.8 + 1.00 \times 0.6 + \frac{(0.8 \times 1.00 - 0.6 \times 1.25)^2}{200} = 1.6\%$$

A·T for flux density  $B = 110,000 \text{ lines/cm}^2$

$$13.4 \text{ VA/lb}$$

Total exciting VA 는

$$13.4 \times 145 = 1940 \text{ VA}$$

Magnetizing current 는

$$I_m = \frac{1940}{6300} = 0.308 \text{ Amp}$$

Iron loss cur 는

$$I_w = 210 / 6300 = 0.0333 \text{ Amp}$$

No load exciting cur 는

$$I_c = \sqrt{0.308^2 + 0.0333^2} = 0.31 \text{ Amp}$$

%Z exciting cur 는

$$(0.31 / 3.97) \times 100 = 7.8\%$$

各負荷에 對한 損失, 入力, 出力, 效率等을 表4에 記戴한다.

表 4.

Load	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4
I <sup>2</sup> R stray load loss	20	78	176	313	489
Core loss	210	210	210	210	210
Total loss	230	288	386	523	699
Out put	6,250	12,500	18,750	25,000	31,250
In put	6,480	12,788	19,136	25,523	31,949
Efficiency	96.5	97.7	98.0	98.0	97.8

변압기 core-coil assembly 의 dimension 은

$$\text{가로} = 4 + 4.5 + 4 = 12.5 \text{ in}$$

$$\text{세로} = 6 + 4.5 + 1 + 2 + 0.5 = 14.0 \text{ in}$$

Tank 의 inside diameter 를 16" 로 하고 유면의 높이를 25" 로 하면

桶의 體積은

$$8^2 \times 25 \times \pi = 5180 \text{ in}^3$$

Core-coil assembly 만의 體積은

$$145 / 0.272 + 47.1 / 0.321 = 680 \text{ in}^3$$

따라서 油의 體積은

$$5180 - 680 = 4500 \text{ in}^3 = 19.5 \text{ G/A}$$

重量은

$$19.5 \times 7.0 = 136 \text{ lb}$$

Tank 의 平均 溫度上昇은

$$\theta_{1m} = \frac{523}{(0.0007 + 0.0006) \times 16 \times 25 \times \pi \times 6.45} = 49.7^\circ$$

油溫上昇은

$$49.7^\circ + 5^\circ = 54.9^\circ$$

捲線의 溫度上昇은

$$54.9^\circ + 5^\circ = 59.9^\circ$$

Transformer design sheer

Kva.25 Phase, Single Cycles, 60 Volts HV., 6300		H.V.,	
Type. HL-65 Liue Amperes LV., 119 Phase Amperes LV.,		Type of Cooling Sejf, Oil	
Core		Resistance	1.25
Steel sheet	Hipersil .30mm	Reactance	1.00
Out constant	.80	Percent: Impedance	1.60
Core leg	Center Outside	Power factor	80 100
Area	22.3	Regnlation	1.60 1.26
Diameter		Total core	210
Dimensions	4.0×6.0	Lossos: Stray load	31
Density	110,000	Percent: Tota copper	313
Weight	145		
Core factor		Load	25 50 75 100
Yoke:		Efficiency	96.5 97.7 98.0 98.0
Area		Square inches per watt	
Dimensions		Ratio of losses	.67
Density		Ratio of weighes	3.08
Weight		TANK plain	
Copper space factor, f	.35	Type of bank, corrugated sheet steel	
Window dimensions	6.5×2.25	Square inches per watt	2.4
Lamination factor kl	.95	Total wetted surface	1260
CORE and WINDINGS		Depth of oil	25
Mean length of flux path	23.8	Callons of oil	19.5
Total VA	1940	Weight of oil	136
Magnetizing current	.308	Cooling coils:	
Core loss cnttent	.0331	Size	
Exciting current;		Length	
Ampers	0.31	Surface	
Per cent	7.8	Water, gallons per minute	

Windings	High-voltage	Low-voltage
Type of winding .....	concentric	concentrif
Connections .....		
Conductor: Dimension .....	0.0607 FVCW	0.144x 0.289
Section .....	0.00255	0.0408
Number in parallel.....	none	2
Current density.....	1560	1460
Turns per phase .....	960	32
Coils: Total number .....	2	2
Per core leg .....	2	2
Turns: Per coil.....	480	16
Per layer .....	45	8
Number of layers.....	11	4
Coil: Connections .....	series	series & parallel
Dimensions .....	.79x2.73	.354x5.53
Ducts, number and size .....	1/2"TKx2	none
Insulation: Layer .....	.012x1	.012x2
Core and Coils .....		.125 PB
HV and LV .....		.125 PB & 188 PB
Voltage per turn .....		6.56
Maximum voltage between layers .....		590
Length of mean-turn .....	29.0	29.0
Copper: Weight.....	22.8	24.3
Loss .....	162	151
Resistance, 85°C .....	.0107	10.3
Per cent and turns with extra insulation .....		

Ⅷ. 結 論

여기 例로 設計된 變壓器와 K.S.의 이에 該當되는 變壓器와를 比較할 때 (16)式은 各各

$$\text{新規格 年間 全運轉費} = 13150 + 5.56 P^2$$

$$\text{K.S. 規格 年間 全運轉費} = 1330 + 6.35 P^2$$

이것을 25年間 每年 1KVA式 過負荷시켜 最終 年度에 50KVA 까지 負荷했을 경우의 運轉 費用은 各各 524 990원, 560880원으로서 그 差는 35790원이 되며 新規 變壓器가 35790원의 得이 됨을 알수 있다. 以上으로 結論을 하자면

1. 變壓器 仕様中 鐵損과 銅損과 銅損의 比率는 全壽命 期間中 全運轉費가 最小 되도록 定해야 한다.
2. 變壓器 價格은 鐵 및 銅의 單價 變化에 依해서 決定되는 것이지 鐵損과 銅損의 比率에는 無關함으로 1項의 條件에 關係 없이 그 價格을 調節 할수 있다.
3. 絶緣物, 冷却油의 發達로 말미아다 新 仕様 變壓器의

價格을 高効率이면서 舊 仕様 變壓器와 같이 할 수 있다.

4. 設計 技術의 進歩에 信賴하여 2倍의 過負荷까지 許容해야 한다.
5. 4項의 경우 需要家の 不平을 除去키 爲하여 電壓變動率을 改善해야 한다.  
이는 溫度上昇 限度를 增大 시킴으로서 冷却에서 節約되는 費用을 鐵 및 銅에 分配함으로써 이루어진다.
6. 韓電 系統 諸係數가 地方的으로 相異함으로 地方的으로 區分 仕様을 決定지어야 할 것이다.
7. 原來 本 研究에 着手時는 韓電 系統에 適合한 新 仕様 變壓器 全體에 對한 仕様을 決定 지을 豫定이었으나 韓電 統計의 未備와 原資材 入手 事情 其他로 具體的인 仕様을 提示못하게 되고 以上과 같은 仕様 決定 方法을 究明함에 그치게 되었다.

(1965年 10月 8日 接受)