

Convex型 卷線配置方式을 취한 卷鐵心變壓器의 衝擊波絶緣設計에 관한 연구

22~3~2

— 衝擊波에 대한 卷鐵心變壓器의 絶緣協調 —

Study on Insulation Design of Surge Voltages for Convex Winding type Ribbon Core Transformer

황 영 문* · 조 철 제** · 김 중 한***

(Young Moon Hwang, Chul Je Cho, Choong Han Kim)

Abstract

In this report, as a method to solve the problems on impulse insulation coordination in ribbon core transformer owing to it's BIL stepping up, new design to alter winding distribution of multiple-layer concentric winding to Convex type winding is proposed. The main focus of this method is to settle the weakness of axial direction insulation strength and as a result of theoretical analysis through experiment of model transformers, the following conclusions are obtained: (a) As the electric loadings in a design which increases by strengthening axial direction insulation endurance in presently available transformers owing to it's BIL stepping up can be restricted in Convex type winding, reasonable design will be suited to the transformer with higher BIL. (b) Convex type winding is a very improved insulation design in respect of insulation coordination because it has shield plate effect to even impulse oscillation. (c) There is a disadvantage to cause leakage flux to increase in Convex type winding, however, the constancy of electric loadings in a design in spite of BIL stepping up restricts the increase of leakage flux to some extent.

1. 서 론

電力需要가 증가하게 되고, 農漁村電化가 추진됨에 따라, 配電電壓의 昇壓이 필요하게 되었다. 동시에 柱上用變壓器도 높은 標準衝擊絶緣強度(Basic impulse insulation level, BIL)를 갖어야 하게 되었다. 현재 柱상용변압기로서는 卷鐵心型이 전적으로 이용되고 있는데, 이러한 변압기는 磁氣裝荷를 적게하여, 全日效率을 높이기 위한 조치로서, 원래 이들의 設計主眼點을 磁氣特性改善에 두고 있다. 그리하여 저압의 柱상變압기로 적당한 것으로 되어 있었으나, 배전전압의 昇압,

그리고 계통용상 BIL이 높고 電壓比가 큰 柱상용變압기의 필요성때문에, 卷鐵心型도 BIL이 125[KV]이고, 전압비가 13.8KV/105V와 같이 큰것이 요구되어, 변압기내부의 권선배치에 따른 충격과절연특성이 문제가 되고 있다. 높은 절연강도가 요구됨에 따라. 卷線配置構造는 물론 磁氣回路構造도 絶緣破壞離隔距離로 인하여 훨씬 크게 하여야 하기 때문에, 所要 磁氣裝荷가 늘어나, 卷鐵心型의 본래의 특성상 잇점을 잃게 될 우려가 생겨나게 되었다. 현재 BIL 125[KV]용 권철심변압기에서도 부득히 磁氣裝荷를 증가시킬수 밖에 없는데, 권철심변압기의 勵磁特性改善이라는 잇점을 살리는 방향으로 설계를 한 결과, 電氣裝荷가 30[%]정도 불어나서, 이것이 勵磁特性을 나쁘게 함은 물론, 종합적인 변압기 설계에서 不合理한 結果를 낳게 하고 있다. 또한 이러한 점은 BIL이 125[KV]이상의 卷鐵

* 정희원 : 부산대학교 공과대학 교수(공학박사)

** 정희원 : 부산대학교 공과대학 강사

*** 정희원 : 한영공업주식회사 설계부장

心型에서 더욱 심각하게 되어, 현재의 變壓器內部的 絕緣協調方式으로는 더이상의 BIL昇壓을 어렵게한다.

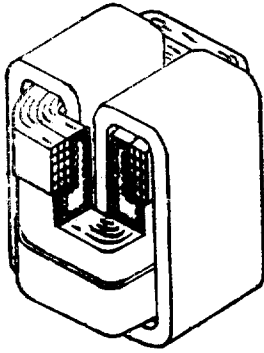


그림 1. Convex형 권철심 변압기의 권선구조도
 Fig. 1. Distribution diagram of H.V. and L.V. windings of Convex type ribbon core transformer

本論文에서는 BIL상승에 따른 變壓器內部的 絕緣協調上의 취약점을 개선하는 수단으로서 高低壓卷線의 配置를 그림 1과 같이 한 Convex type distribution type ribbon core transformer를 제시하고, 이들의 絕緣設計를 중심으로 설계, 제작, 검토하여 實用變壓器로서의 적용가능성을 고찰하고자 한다.

2. BIL이 높아짐에 따른 卷鐵心變壓器設計에 있어서의 문제점

(1) 충격파절연설계에서의 문제점

권철심변압기의 철심재료는 磁束密度가 높은 냉간압연박관규소강판으로 積層率이 98[%]의 것을 들들 말아서 사용하고 있으므로 소요여자 암페어턴 및 철손이 적은 것이 특징이다. 그러므로 勵磁特性이 좋아야 하는 주상용변압기에 이용되고 있으며, 소요중량도 가벼운 것이 보통이다. 그리하여 될 수 있는대로 철심재료가 적게 들도록, 즉 磁氣裝荷가 적도록 설계한다. 이러한 이유로 철심창구는 상당히 적어지고 철심형식은 외철형(shell type)이 보통이다. 따라서 철심창구의 銅線占有率도 다른 형에 비하여 높은 30[%]~55[%]의 것이 많다.

이렇게 銅線占有率을 크게 하는 것도 多重層同心圓筒狀卷線方式를 채택함으로써, 無振動에 가까운 衝擊波內部電位振動特性이 되게 함으로서 가능한 것이다. 그러나 基本耐雷絶緣設計에 따르면, 그 중 한가지 조건, 즉 특히 電位振動係數 α 를 적게하는 조건만을 만족시키지, 다른 조건은 다만 그 극한상태를 피할 수 있는 低電壓에서만 적용된다. 그러나 이외의 다른 중은 전

기적 특성은 적극적으로 활용한 변압기이다. 이것이 권철심변압기가 低壓用으로만이 이용되어 온 이유이다.

(1) 基本耐雷絶緣設計 검토

BIL이 높아짐에 따라 권철심변압기는 卷線絶緣設計가 먼저 검토되어야 하며 이를위한 종래의 基本絶緣設計指針²⁾을 요약하면 다음과 같다.

i) 電位振動係數 α 를 될수 있는대로 적게하기 위하여, 直列커패시턴스는 크게, 並列對地커패시턴스는 적도록 卷線配置를 하여야 한다.

ii) 局部的電位傾度집중에 견딜수 있도록 内部絶緣을 충분히 강화한다.

iii) 卷線에 shield판을 붙여 直列커패시턴스량을 증가시키도록 하며 이로써 卷線端部 및 層端部의 電位傾度집중을 완화하도록 하여야 한다.

iv) 絶緣物의 沿面距離에 의한 絶緣耐力는 衝擊比가 적으므로 沿面距離를 연장시켜 절연파괴를 억제하게 하는 설계는 하지 말아야 한다.

이상과 같은 設計指針을 권철심주상변압기의 多重層同心圓筒卷線에 적용하여 검토하여 보면 다음과 같다.

(1) 卷線軸의 半徑方向絶緣

i)의 경우에 대하여는 多重層同心圓筒卷線이 다른 권선방식에 비하여 월등히 우수하다. 즉 層間커패시턴스는 層當對面積이 크고 간격이 좁아서, 直列커패시턴스가 크다. 그리고 이러한 直列커패시턴스는 層數가 적을 수록 커지는 반면, 식(2-1)에서 알수 있는 바와 같이 層當電位가 커져서 層間絶緣強度를 높여야 함으로

$$\frac{e}{E} = 1 - \frac{\sinh\alpha \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)}{\sinh\alpha} \quad (2-1)$$

여기서 e : 층당전위

E : 기준충격파절연테벨(BIL)

N_i : 총층수

n_i : $(N_i - 2)$ [U형], $(N_i - 1)$ [N형].

$$\alpha = \sqrt{\frac{\text{全對地靜電容量 } c}{\text{全直列靜電容量 } k}} = N_i \sqrt{\frac{c}{k}}$$

c : 層當對地靜電容量

k : 層當直列容量

에서 e/E 의 값이 가장 적은 값이 되도록 N_i 의 값을 결정한다. 層當分擔電位는 線路端에 가까울 수록 커지므로 線路端의 分擔電位差를 層間絶緣의 基準衝擊波電壓으로 택하여 절연설계를 하되, 多重層圓筒狀卷線에서는

$$e = E \left(1 - e^{-\frac{\alpha}{N_i}}\right) = \alpha \cdot \frac{E}{N_i} \quad (2-2)$$

로 되어, 平均分布시의 分擔電壓 $\frac{E}{N_i}$ 의 α 배 만큼 커 절연강도를 높여야 하나, 일반적으로 多重層圓筒卷線에서는 α 가 2~1.5이므로 平等分布와 같으며, 동시에

内部電位振動도 상당히 완화된다.

권철심주상변압기는 현재 1端接地變壓器로 이용되는 데, 이때의 對地커패시턴스는 맨 외측권선층과 외측저압권선과의 對向커패시턴스만을 고려하고, 권선의 축방향의 철심과의 對向커패시턴스는 매우 적으므로 무시하며, 내측저압권선과의 對向커패시턴스는 큰 값을 갖이나, 접지단자와 가까움으로 이를 고려에 넣지 않는다.

이상으로 창구가 적은 권철심에 銅線占有率을 높게 하여 권선절연설계를 쉽게 할 수 있는 것은 多重層同心圓筒巻線의 특성을 이용하여 電位分布를 고르게 하고, 이를 권선축의 반경방향으로 電位傾度를 갖게 하여

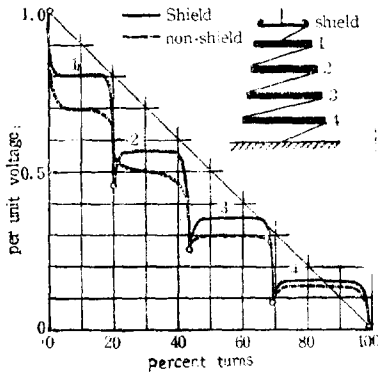


그림 2. 다중층동심원통권선의 충격파초기 전위분포
Fig. 2. Initial impulse voltage distribution of multiple-layer concentric winding

層間絶緣紙의 貫通方向破壞徑路방향으로 분포하게 할 수 있기 때문이다.

그러므로 半徑方向絶緣耐力은 이로써 충분하다.

(c) 局部電位傾度集中

다중층동심원통권선절연에서 BIL이 높아짐에 따라 심한 취약성을 나타내는 것은 巻線의 軸方向絶緣強度를 쉽게 높일수 없다는 점과 그림2에서 보는 바와 같이

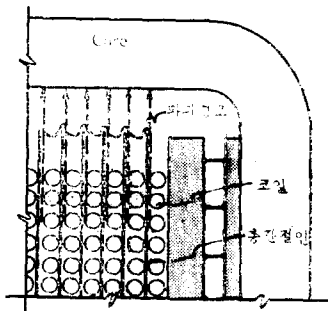


그림 3. 축방향절연과괴경로
Fig. 3. Destroy path of axial-direction in solution

層端部에 局部電位傾度가 집중하여 層間的 크립프(creep)절연과괴가 쉽게 일어난다는 점이다.

局部電位傾度의 집중으로 그림 3과 같이 절연과괴가 일어나는데, 현재 층간절연지를 연장하여 크립프거리를 크게 할려고 하고 있으나 이는 효과적인 절연과괴 억제방식이 못되고 있다.

銅線占有率을 높이기 위하여, 층간절연지는 필수 있는 대로 얇은 것을 택하기 때문이다. 이러한 절연과괴를 억제하는 방식으로는 그림 4에서 보는 바와 같이 端部코일만이 라도 코일단면을 크게 하거나 피복코일

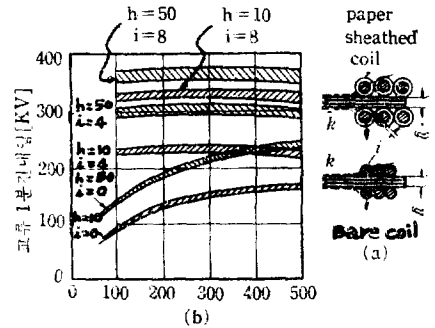


그림 4. 크립프절연특성
Fig. 4. Creep insulation characteristics

을 쓰든가, 局部電位傾度를 평등히 하는 shield판을 부착시키든가 하여 집중電位傾度를 완화시키는 방식을 채택하여야 할 것이다.

(d) 巻線의 軸方向絶緣

그림 3에서 보는 바와 같이 軸方向絶緣은 다중층원통권선에서 층간절연지의 沿面方向이므로 衝擊比가 적은 絶緣紙로서 거의 절연과괴억제를 기대할 수 없고, 다만 층단부와 철심사이의 clearance를 크게하여 절연거리를 크게 하는 수 밖에 없다. 이때 크립프거리연장을 위한 층간절연지의 연장은 층단부의 국부적 전위경도 집중으로 沿面放電이 일어나면, 크립프연장이 軸方向絶緣距離를 줄여서 절연과괴를 쉽게 하는 결과를 갖어오게 한다. 권철심변압기에서는 창구면적이 적어서 충분한 軸方向絶緣距離를 얻을 수 없는 점이 BIL을 높이지 못하는 원인이며, 현재 BIL 125[KV] 변압기에서는 軸方向窓口길이의 약 40[%]의 거리가 이러한 軸方向絶緣距離로 이용되고 있어, 銅線占有率을 낮게 함은 물론 磁氣裝荷의 증가를 필요로 하고 있다.

(2) BIL昇壓으로 인한 軸方向絶緣強度補強策이 電氣裝荷 및 磁氣裝荷에 미치는 영향

현재 BIL125[KV] 권철심주상변압기는 권선의 축방향절연이거리를 400[mm]로 크게하여 절연내력강도를 높이고 있다.

이것에 비해 BIL60[KV]에서는 20[mm]로 하고 있

다. 앞에서 말한 바와 같이 주상변압기로서는 철손의 제한 조건으로 같은 용량의 변압기에서는 BIL60[KV]나 BIL125[KV]나 같은 鐵心重量을 갖어야 하기 때문에, 같은 크기와 구조를 갖인 鐵心을 이용하여야 한다. 이렇게 되면, BIL125[KV]에서는 필요한 축방향이격거리를 낼수 없다. 그러므로 鐵心斷面을 늘이고 鐵心길이를 길게 하는 鐵心設計를 하여야 한다.

지금 10[KVA]의 변압기에서

BIL60[KV] : 鐵心斷面(137×44mm) 磁束密度 16,000 [gauss], 鐵心窓口(140×54mm), 銅線占有率 56[%]

BIL125[KV] : 鐵心斷面(120×38mm), 磁束密度 16,000[gauss], 鐵心窓口(184×62mm), 銅線占有率 42[%]인 두개의 철심을 shell type로 설계하고 있어, 용자속수비는 BIL60[KV]대 BIL125[KV]가 1 : 0.75

특성을 나쁘게 한다.

BIL증가에 따른 磁氣裝荷 및 電氣裝荷의 증가추세를 보면 그림 5와 같다.

그리하여 卷線의 軸方向絶緣設計로 인하여, 鐵損 : 銅線비가 주상변압기로서의 適定值인 1 : 2.5~3.5의 범위를 벗어나게 하고 있으며, BIL125[KV]이상에서는 이러한 문제점은 더욱 심각하여지므로 이 이상 BIL昇壓을 하지 못하는 원인으로 되어 있다.

3. Convex卷線配置를 갖는 多重層同心圓筒卷線變壓器

(1) Convex卷線配置方式의 提案

앞절에서의 현행변압기에서의 가장 큰 취약점인 卷線

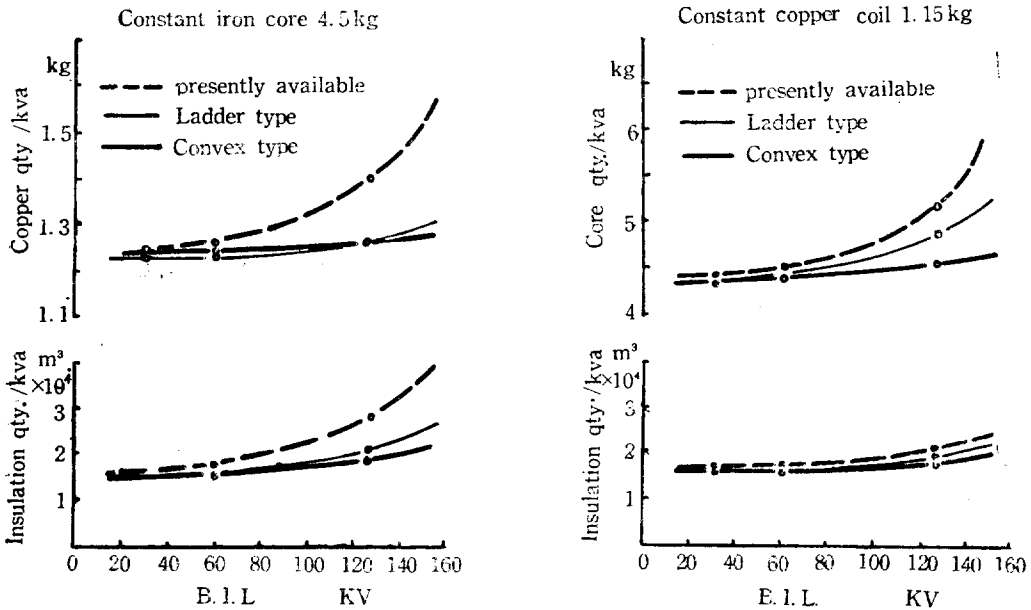


그림 5. BIL승압에 따른 철심 및 동선중량의 증가
Fig. 5. Core and coil weight increase due to BIL stepping-up

입으로, 소요권선수는 $1 : 2 \times 1.31 = 1 : 2.62$ 이 되고, 고압측(여차측)동선단면비는 $1 : 1.31$ 로서 電氣裝荷가 BIL이 60[KV]에서 125[KV]로 됨에 따라 30[%]더 증가하게 된다.

한편 동일한 電氣裝荷를 갖이기 위하여는 鐵心斷面이 동일하여야 하는데 이때 BIL을 60[KV]에서 125[KV]로 올리면, 鐵心重量은 15[%]더 증가하게 된다.

위의 두경우가 모두 BIL를 높이면 電氣裝荷 혹은 磁氣裝荷를 증가시키는 결과를 가져오기 때문에 鐵損증가, 銅線증가, %입피이던스증가를 받게 되어, 電氣의

의 軸方向絶緣破壞를 억제 하는 방법으로 그림 6과 같은 卷線配置方式를 채택하여 이를 검토한 결과 아래와 같다.

(ㄱ) Convex卷線配置方式의 背景과 利點

i) 현재 低壓卷線을 全絶緣하여, 高壓卷線의 半徑方向 內外側에 배치하고 있는 것을 軸方向으로 옮겨, 軸方向絶緣強度를 높임으로 해서 축방향의 철심간의 이격거리를 좁힐 수 있다.

ii) 현행 BIL125[KV] 주상용변압기는 1端接地變壓器로 이용하고 있어, 고압권선의 線路端側軸方向의 絶

線破壞만이 문제가 됨으로, 저압권선을 축방향의 상하에 선로단측에 배치하게 한다. 이렇게 하는 이유는 저압권선을 축방향으로 옮긴다 하여도 고압권선의 크립프 거리는 필요함으로 고저압권선사이의 거리가 멀어 %임피던스를 크게 할 우려가 있는 것을 다소 완화시키지 위하여서다.

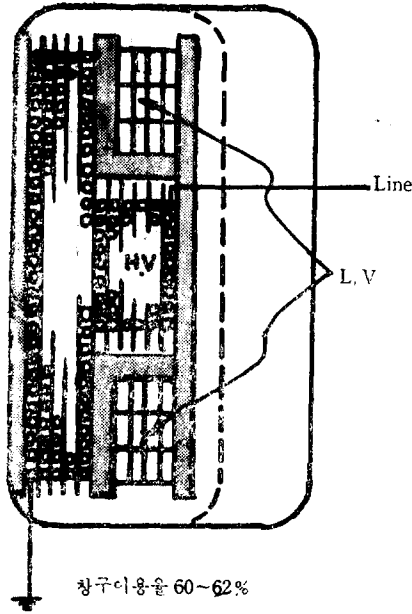


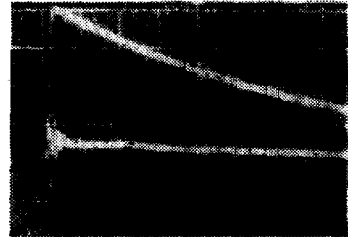
그림 6. Convex권선배치도
Fig. 6. Winding distribution of Convex type winding

iii) 그림 2에서 보는 바와 같이 선로단에 shield판을 부치는 효과는 層卷線의 電位分布가 衝擊波印加點에서 대칭으로 하여 평등한 電位分布를 갖게한 것으로 볼수 있으므로, shield판을 부치지 않더라도 내부측고압권선에 대하여 외측고압권선의 위치를 層卷線의 중간점에 오도록 하여, shield판 효과와 유사한 효과를 갖게한다. 供試變壓器에서 shield판을 붙였을 때의 효과와 Convex卷線配置를 하였을 때의 효과를 비교검토한 결과 그림 7과 같다.

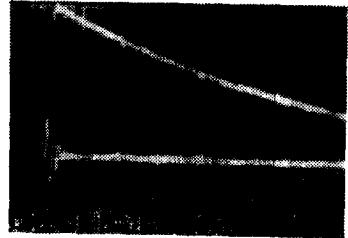
(a) 도는 현행방식의 권선배치에서의 충격파특성이고, (b)도는 shield판을 붙였을 때의 것이며, (c)도는 Convex권선배치방식에서의 충격파특성인데, 이들은 모두 저압권선의 1단을 접지하였을 때의 저압단전위 진동현상이다. 다중중동심원통권에서는 흔히 계형(Ladder type)권선배치방식을 채택하는 이유도 이러한 데 있다. 후술하는 내부고압권선특성에서도 이러한 현상이 일어나는데, 이로써 Convex권선배치가 shield

판효과를 어느정도 갖고 있음을 알 수 있다.

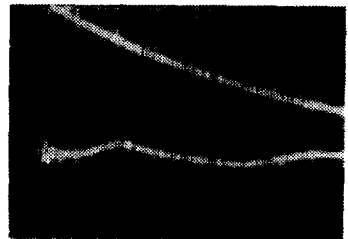
vi) 고압권선의 선로단측권선층단에서 심한 집중스트레스가 일어나기 쉬운데 이들의 층단의 축방향의측에 저압권선을 배치함으로써 rib shield²⁾효과를 갖게하여 局部電位傾度의 集中을 완화하는 효과를 갖도록 하였다.



(a) 현행 nonshield면압기 권선



(b) shield판 설치권선



(c) convex권선배치권선

그림 7. Convex권선배치의 shield판 효과 비교도
Fig. 7. Shield plate effect of Convex winding distribution method

v) Convex卷線配置를 함으로써, 축방향절연이격거리를 크게 할 필요가 없어졌으므로 BIL昇壓에 인한 磁氣裝荷 및 電氣裝荷를 증가시킬 필요가 없다. BIL125 [KV]의 경우 BIL60 [KV]의 鐵心を 그대로 이용할 수 있으며, 所要卷線數는 2배가되나, 所要銅線重量은 동일함으로, 銅線占有率은 42[%]에서 56[%]로 높일 수 있다. 그림 9의 卷線配置設計에서는 이격거리를 20 [mm]에서 15[mm]까지 줄여서 설계한 결과 62[%]까지 높일수 있었다.

(ㄱ) 漏洩리액턴스에 대한 검토

高壓卷線과 低壓卷線의 結合度의 표시는 %임피던스電壓과 短絡電流에 의한 機械的스트레스는 卷線配置方法에 따라 달라지며, 이러한 것은 商用周波數에 의

한 定常運轉特性和 깊은 관련성을 가지고 있다. 이 두 成分은 서로 각각으로 분포되어 있으므로 相互誘導는 무시할 수 있어, 全漏洩리액턴스는 半徑方向漏洩리액턴스와 軸方向漏洩리액턴스를 합한 것으로, Convex형

r_a, r'_a : 권선반경 [m]

dk : 권선폭 [m]

그림 8과 식(3-2)에서 무효전력은 Rectangular 권선배치방식 :

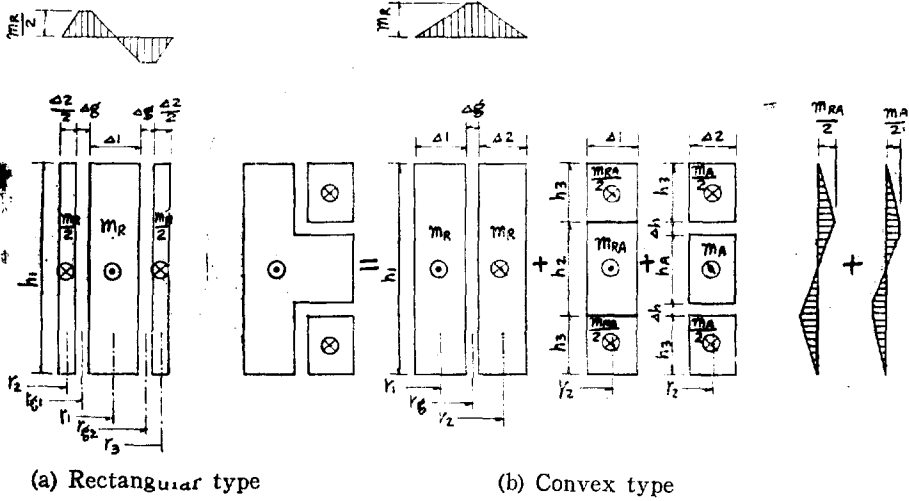


그림 8. 누설자속의 분포도

Fig. 8. Distribution diagram of leakage flux

은 半徑方向漏洩리액턴스는 줄어든다, 새로이 軸方向漏洩리액턴스가 나타나므로, 漏洩리액턴스로 볼때 다소 불리하다.

지금 漏洩리액턴스를 계산함에 있어 다음과 같은 無効電력을 구하여 계산하는 방식²⁾을 이용한다. 즉

$$\% IX = \frac{[KVA] \times 10^5}{(IN)^2 e^2} [I^2 X] \quad (3-1)$$

이며, 여기서

$I^2 X$: 누설자속에 의한 무효전력 [VA]

$$= \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^7 \cdot h} \left\{ \frac{1}{2} [m^2 r_a g_k + m_k^2 + m^2 k^{-1} + m_k m_{k-1}] \times \frac{r'_k d_k}{3} \right\} [VA] \quad (3-2)$$

e : 코일당 유기전압 [V]

IN : 암페어턴

m_k : n_{ik}/IN

$$(I^2 X)_R = \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^7 h_1} \left[(r_{e1} + r_{e2}) \Delta_e + \frac{(r_2 + r_3) \Delta_2 / 2 + r_2 \Delta_1}{3} \right] \left(\frac{m_R}{2} \right)^2 [VA] \quad (3-3)$$

Convex 권선배치방식 :

$$(I^2 X)_C = \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^7} \left\{ [r_e \Delta_e + \frac{r_1 \Delta_1 + r_2 \Delta_2}{3}] \frac{m_R^2}{h_1} + \frac{2}{\Delta_2} \left[\frac{r_2 (h_3 + h_2 / 2)}{3} \right] \left(\frac{m_{RA}}{2} \right)^2 + \frac{2}{\Delta_2} \left[\frac{r_2 (h_3 + h_2 / 2)}{3} \right] \left(\frac{m_A}{2} \right)^2 + \frac{2}{\Delta_2} \left[r_2 \Delta_k + \frac{r_2 (h_3 + h_A / 2)}{3} \right] \left(\frac{m_R}{2} \right)^2 \right\} [VA] \quad (3-4)$$

공시변압기의 설계도에서 식(3-3)과 식(3-4)의 각각의 값을 구하여 보낼 Table 1과 같다.

Table 1. Calculated data sheet of leakage reactance

권선배치	각항	m_R	m_{RA}	m_A	r_e	r_{e1}	r_{e2}	r_1	r_2	r_3 [mm]	
Rectangular (현행)		1.00	—	—	—	48.2	82.5	65.0	43.6	89.1	
Convex(B)		0.68	0.29	0.32	63.0	—	—	53.5	74.5	—	
권선배치	각항	h_1	$h_{1k}(k)$	h_2	h_3	h_A [mm]	Δ_e	Δ_1	Δ_2	$\Delta_{2A}(k)$	Δ_k [mm]
Rectangular (현행)		104	112(0.925)	—	—	—	5	30	13	—	—
Convex(B)		110	128(0.860)	48	39	32	3	16	20	46(0.43)	8

지금 각 권선배치방식의 I^2X 의 값은

$$(I^2X)_R = \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^3} \times 70.6 [VA]$$

$$(I^2X)_C = \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^3} [69.2 + 26 + 44]$$

$$= \frac{496 \times f \times (IN)^2}{10^3} \times 139.2 [VA]$$

%임피던스(%IX)의 값은($e_R=3.5[V]$, $e_C=4.6[V]$)

$$(\%IX)_R = \frac{4.96 \times f \times [KVA]}{10^4 e_R^2} \times 70.6 = 1.71 [\%]$$

$$(\%IX)_C = \frac{4.96 \times f \times [KVA]}{10^4 e_C^2} \times 139.2 = 2.18 [\%]$$

이다. 여기서 Convex형은 Rectangular형에 대하여 127[%]의 %임피던스의 증가가 있다. 이는 Convex(B)의 경우로, Convex(A)형은 192[%]의 값을 갖게 되므로 Convex형에서는 원칙적으로는 %임피던스가 더 증가하나 권선배치방식을 적절히 하면 누선임피던스도 어느정도 까지 줄일수 있음을 알 수 있다.

(2). Model變壓器의 設計 및 製作

Convex型卷線方式의 Model變壓器를 실제제작함에 있어서, 현행변압기와 비교검토하기 위하여, 설계는 다음과 같은 A,B 두형에 대하여 하되, 현행 BIL125 [KV]변압기의 철심을 이용한 A형의 것만이 제작되었다. 또한 Convex型의 基本的事項을 검토하기 위하

(ㄱ) Convex型(A)변압기의 절연설계

그림 9는 10[KVA], BIL125[KV]용, 철심창구(184×51mm), 철심단면(120×38mm)의 설계도이고 Table 2는 이의 절연설계시방서이다.

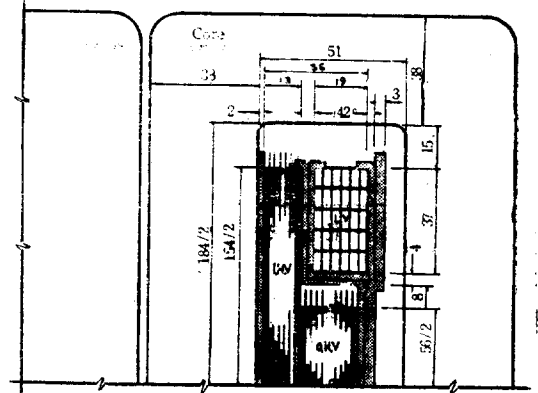


그림 9. Convex 형(A)의 권선배치 및 절연설계도
Fig. 9. Design diagram of coil and insulation distribution for Convex (A) type winding method

(ㄴ) Convex형(B)변압기의 절연설계

그림 10은 10[KVA], BIL125[KV]용, 철심창구(140×54mm), 철심단면(137×44mm)의 설계도이고

Table 2. Design sheet of Convex (A) type winding method unit [mm]

	도체	권수	층당권수	층수	층간절연	비	고
철심—I·H·V간	—	—	—	—	4(0.38)K _p		
I·H·V	0.7φ	2532	194	13	0.25 K _p		
I·H·V-L·V간(A)	—	—	—	—	4(0.38)K _p	늘어나는 절연지를 사용함	
I·H·V-L·V간(B)	—	—	—	—	4(0.38)K _p		
L·V×2	2.4×7.0	30	5	6	—	층간절연은 생략됨	
O·H·V	0.7φ	1400	70	20	0.25 K _p	L·V권선을 한후에 권선	
O·H·V L·V—철심간	—	—	—	—	8(0.38)K _p		

코 일 평 균 장 :	L·V	605					
	I·H·V	455			O·H·V		605
코 일 총 길 이 :	L·V	36.3×10 ³					
	I·H·V	1153×10 ³			O·H·V		847×10 ³
코 일 중 량 :	H·V	7.05[kg]			L·V		5.6[kg]
철 심 중 량 :		43.6[kg],			철심창구(184×62mm)		철심단면(120×38mm)
절 연 치 :		0.25K _p ,			204wd×14[m]		
		0.38K _p ,			204wd×20[m]		

Table 3은 이의 절연설계 시방서이다. (B)형의 것은 현행변압기설계에 shield판을 붙인 Ladder형 변압기를 아울러 제작하여 shield판효과를 검토할수 있도록 하였다.

앞서 말한 %리액티스등을 고려하고, 또한 현행 BIL60 [KV]용 철심에 절연설계제한 경우의 것으로, (A)형보다 전기적특성이 양호할 것으로, 설계에서만 검토하고, 절연특성조사는 (A)에서만 하였다.

코 일 경 굵 장 :	I·L·V	457	O·L·V	712
	I·H·V	510	O·H·V	600
코 일 총 길이 :	I·L·V	13.7×10^3 ,	O·L·V	21.4×10^3
	I·H·V	984.3×10^3 ,	O·H·V	1201.8×10^3
코 일 층 량 :	H·V	7.75[kg],	L·V	5.41[kg]
철 심 층 량 :		43.6[kg],	철심창구(184×62mm),	철심단면(120×38mm)
절 연 지 :		0.25K,	204wd×16[m]	
		0.38K,	204wd×23[m]	

위하여, 선로단층의 충전선과 외측저압권선사이에 알미늄판을 설치한 것으로 10[KVA], BIL125[KV]용, 철심창구(184×62mm), 철심단면(120×38mm)의 코일 및 절연배치도이며 Table 4는 이것의 절연설계시방서이다. Model Convex型에서 (A)型을 택한 것은 현행의 이러한 변압기와 비교측정시험을 하기 위함이다.



그림 12. 공시변압기
Fig. 12. Model transformer

(2) 기타설계사항

i) Convex형에서는 저압권선 L·V의 절연은 원통형 절연을 바깥쪽으로 구부러야 함으로 어느 정도 늘어나는 절연지를 택하였다.

ii) Convex형의 권선순서는 I·H·V→L·V×2→O→H·V→전체절연으로 하여, 저압권선의 축방향기계적 내력을 많이 갖도록 하였다.

iii) Convex(B)형은 주로 축방향의 %리액턴스를 줄이기 위하여 충전선높이를 줄이도록 설계되었으며 중간 Tap調整用端子는 I·H·V에 설치하였다.

iv) Shield판은 고압 및 저압권선의 중간층에 설치하였는데, 이는 shield판을 고압 및 저압권선쪽으로 각각 접속하였을 때의 변화를 보기 위한 것이다.

(3) 衝擊波電位分布의 測定圖와 結果

(1) 測定圖

비교측정을 위하여 Ladder형과 Convex형의 Tap 조정용의 단자에서 같은 비율의 권선수를 갖는 단자끼리 비교측정하였다. 이때 물론 층단비율은 Convex형의 것이 적다. 이는 衝擊波初期電位分布에 관계됨으로 측정결과분석에서 이를 고려하기로 한다.

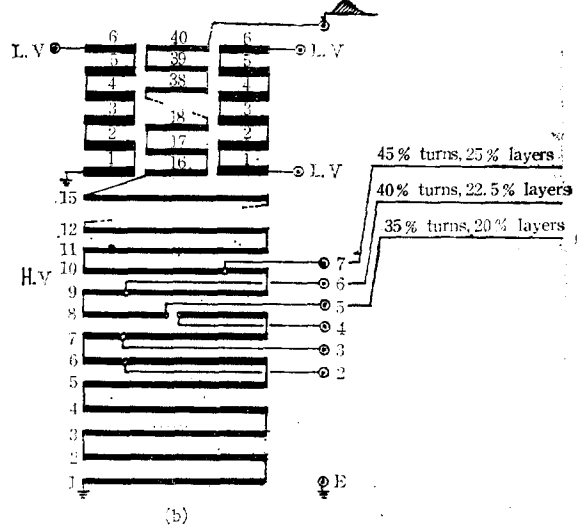
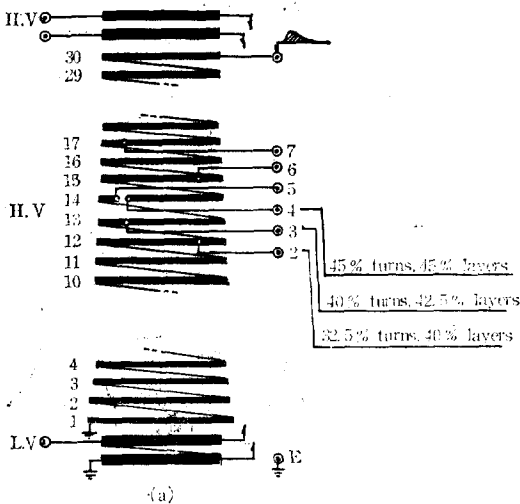


그림 13. 충격과 전위전동측정회로도
Fig. 13. Measurement diagram of impulse voltage oscillations

1) 測定結果

그림 14는 Surge analyzer SPG-6C를 측정한 측정결과이며, 그림 15는 Tap조정으로 들어나는 가장 위

험한 상태의 Tap에서의 절단파전위진동현상을 보기위한 測定結果이다.

N-Ladder type

U-Convex type

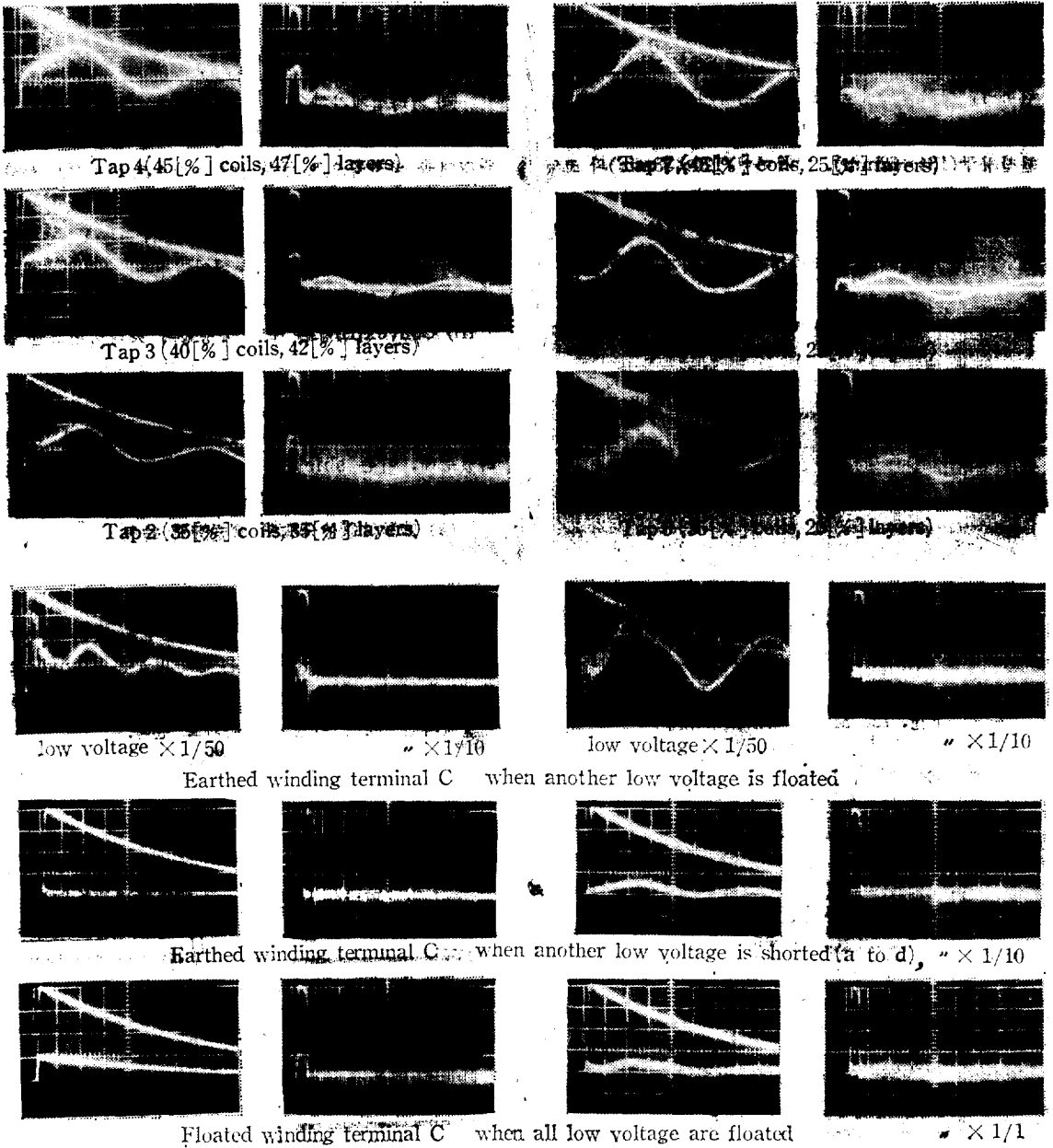
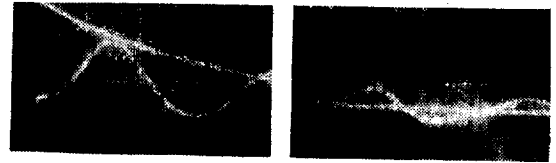


그림 14. 현행 및 Convex형 권선배치시의 충격파전위진동현상

Fig. 14. Impulse voltage oscillation phenomena of Ladder and Convex winding distribution methods (10μs/div)

N-Ladder type

U-Convex type



Tap 4(Tap 2-7 connection)

Tap 4(Tap 2-7 connection)



Most dangerous chopper wave

Most dangerous chopper wave

그림 15. 가장 위험한 상태의 탭조정에서의 충격파전위진동

Fig. 15. Impulse voltage oscillation phenomena at most dangerous tap regulations. (10μs/div)

4. 考 察

(1) 測定結果에 대한 고찰

i) 같은 비율의 코일수의 電位振動을 보면, Convex형은 Ladder형보다 初期分布電位가 훨씬 낮고, 電位振動幅은 크다. 이는 층수비율이 Ladder형의 것의 1/2 정도가 된다고 하더라도 初期分布電位가 1/2보다 더 낮다는 것과 Convex(A)형에서 층당권선수가 Ladder형의 150[%]정도 이므로 권위진동식¹⁾

$$U_s = A_s \sin \frac{s\pi x}{l} \cos \omega_s t \quad (4-1)$$

여기서

$$A_s = \frac{2\alpha^2 l^2 \cos s\pi}{s\pi(s^2\pi^2 + \alpha^2 l^2)}$$

$$\omega_s = \frac{s^2 \frac{\pi}{l^2}}{\sqrt{m(K \frac{s^2\pi^2}{l^2} + c)}}$$

에서 l 의 영향으로 나타나는 진폭의 증가를 감안한 것보다 큰 것은 線路端入力點이 층권선폭의 중간위치에 가깝게 존재한 결과라고 볼 수 있다.

ii) 1~10[μs]내의 초기전위진동분포에서 Ladder형은 불규칙하고 그 진동폭이 큰 高調波成分이 많고

Convex형은 규칙적인 감쇄진동과 그 진동폭이 적은 高調波成分을 갖는다. 이는 shield판설치때 나타나는 일반적인 현상으로, i)의 경우와 함께 Convex형이 shield판효과를 상당히 갖고 있음을 알 수 있다.

iii) 절단파(chopper wave) 특성은 初期分布電位와 初期高調波成分이 적은 Convex형이 훨씬 좋은 특성을 갖게 되며, 가장 심각한 절단파의 경우라도 Ladder형 정도밖에 되지 않는다.

(2) 巻線配置方式에 대한 고찰

i) 충격파대지전위분포가 높은 線路端層端부분에 저압권선을 배치하여, 軸方向絶緣 clearance를 3l[mm] 내지 37[mm] 정도 늘일수 있게 되었으므로, 권선과 철심사이의 축방향거리를 Ladder형의 33[%]로 줄인 15[mm]까지 줄일수 있게 되었다.

이는 BIL昇壓에 따른 電氣裝荷 및 磁氣裝荷의 증가를 막을 수 있게 하고, 이러한 설계상의 제한이 철페뎀에 따라 BIL125[KV]이상의 변압기도 설계제작할 수 있을 것이다.

ii) BIL125[KV], 10[KVA]변압기에서 권선배치를 달리하였을때, 현행설계제작변압기에 대한 主材料對比를 보면 Table 5와 같다.

Table 5. Demand rate of Main materials

권선배치방식	Rectangular	Ladder	Convex A	Convex B	
동선 점유율	42%	57%	60%	62%	주재료 (철심동선 및 절연지)는 제조원가의 65~70 [%]를 차지한다.
철심증량	1.000	0.927	0.895	0.895	
동선증량	1.000	0.946	0.920	0.805	
절연재료량	1.000	0.830	0.790	0.785	
원가대비	1.000	0.908	0.898	0.880	

iii) Convex형은 누설리액턴스가 원칙적으로 늘어난다. 그러나 반경방향누설자속은 Ladder형과 같이 交互配置를 하여 누설자속의 암페어·턴을 줄이는 방식을 채용하지 않는 경우라도, 반경방향암페어턴스는 다소 줄어들게 된다. 그리고 축방향누설자속의 암페어·턴은 Ladder형에서는 나타나지 않았던 것이 Convex형에서는 나타나나, 축방향의 [코일높이]/[코일층폭]의 비가 대단히 적어서 Rogowski係數 k를 적게 잡을 수 있으므로, 축방향등가권선높이가 크게 되고, 또한 Convex(B)형과 같이 하권 원통권선의 권선높이를 줄일 수 있어 축방향누설자속의 암페어·턴은 상당히 줄일 수 있다. 또한 식(4-1)에서 고찰한 전위진동폭도 아울러 줄일 수 있게 될 것이다.

iv) 軸方向누설자속은 Convex(A) (B)형에서와 같이 交互配置가 되어 있어, 암페어·턴의 분포가 軸方向으로 옮길것 만큼 그대로 軸方向누설자속이 되지않고 반으로 줄어들므로 Convex(A)형과 같이 축방향창구길이 긴것에서는 交互配置數를 늘이는 방법도 생각할 수 있다.

그리고 Convex(B)형은 Ladder형에서 보다 코일턴스수가 약 30[%]정도 줄어들므로 누설자속도 많이 줄어들 것이다.

v) 기계적내력은 Ladder형보다 상당히 줄어들 것으로 특별히 軸方向의 機械의耐力이 문제시 되어 저압권선과 절실사이 에 補強 Wedge현형 변압기에서는 이것이 축방향고압권선위에 놓여서 절연과피를 촉진시키는 효과를 갖고 있으나, Convex형에서는 저압권선과 많이 접함으로 그렇지 아니함으로서 이를 개선하는 조치가 필요하다. 그대신 線路端高壓코일은 低壓卷線에 의하여 交互配置를 갖는다.

5. 결 론

(1) BIL昇壓에 따른 권철심변압기의 절연설계의 문제점을 검토한 결과, 축방향절연설계가 가장 취약점을 많이 가지고 있어, BIL125[KV] 이상의 권철심변압기 설계를 불가능하게 하고 있음을 알 수 있었다.

(2) 저자는 이러한 취약점을 해결하는 조치로서 多重圓筒卷線의 卷線配置를 Convex型으로 하였고, 이들에 대한 衝擊波絶緣協調를 Model변압기에서 실측한 결과 차폐판을 부치지 않더라도 Shield plate effect가 상당히 나타나서 충격과절연특성을 좋게 하고, 특히 初期分布電位가 고르게 되어 截斷波特性을 많이 개선할 수 있게 되었다.

(3) 이러한 결과와 아울러, Convex型으로 권선배치를 하면, BIL昇壓으로 말미암아 축방향절연 clearance

를 늘려야 할 필요성이 없게 되므로, 현재와 같이 電氣裝荷를 30[%]정도 증가시키지 아니하여도 되며, 따라서 주재료비율 8~12[%]정도 절약할 수 있다.

(4) 권철심변압기가 충격과절연협조상의 제약으로, 저압외에는 이용되지 못하고 있었으나, 본 연구에서와 같이 卷線配置方式등을 새로이 고안하는 등, 특별한 衝擊波絶緣協調方式을 채택하면, 경제적인 高壓用變壓器로도 이용할 수 있을 것이다.

(5) Convex권선배치방식에서는 軸方向漏洩리액턴스가 새로이 생겨나서, 단락시기계적스트레스와 함께 문제시 된다. 그러나 현행 Rectangular형에 비하여 소요권선수가 약 30[%]정도 적고, 축방향누설자속을 생기게 하는 권선이 交互配置되어 있어, 불리한 여건을 많이 감쇄시킬수 있고, 기계적내력은 파르 補強材에 의하여 충분히 높일수 있을 것으로 본다. 이상으로 電力需要의 증가, 農漁村電化에 따른 配電線路의 昇壓으로, 연간 80만[KVA]로 想定되고 있는 卷鐵心柱上變壓器의 BIL昇壓에 대처한 새로운 卷線配置方式의 絶緣協調의 기본적사항을 검토한 바를 발표하는 바이다.

본 연구는 科學技術處의 72년도 研究開發基金에 의하여 이루어졌다. 끝으로 이러한 연구가 앞으로도 계속 될 것임을 약속드리면서, 그동안 여러모로 협조와 조언을 주신 관계기관 여러분께 심심한 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) L.V.Bewley: Traveling Waves on Transmission Systems, p.421, 455~460, 510, Book 1963, Dover Pub.
- 2) 淺川, 清水: 變壓器, p.54, 118~124, Book 1966, 日刊工業新聞社
- 3) 木村久男: 變壓器의 設計工作法, pp.192~200, book 1961, 電氣書院
- 4) A.A.Johnson: Insulation Coordination, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, p.610, 1950, Westinghouse Electric Co.
- 5) B.L.Lloyd: Distribution Transformers, Electric Utility Distribution Systems Engineering Reference Book, p.210, 1959, Westinghouse Electric Co.
- 6) 朴旻鎬: 誘導機器 p. 36, 170, 1970 동명사
- 7) Alfred Still, Charles S. Siskind: Elements of Electrical Machine Design, 3rd ed. McGraw-Hill, Book 1954 pp. 339~403.