技術報告

大型ケーブル乾燥用真空排気系

金子 隆 治*

(昭和38年1月31日受理)

The Large Vacuum Drying Systems for Electric Cables.

Ryuji KANEKO

(Nippon Electric Wire and Cable Co., Ltd. 65, Furukawa-Dori, Kawasaki City, Kanagawa-Ken, Japan)

Recently the demand for electrical energy has been increasing rapidly, hence the EHV underground cables as well as the EHV transmission lines are required.

As the insulation of these EHV cables, oil impregnated papers are generally in use. The electrical characteristics of this material is influenced very much by the degree of vacuum drying.

This paper describes the large vacuum drying systems for electric cables set recently in our company which has the newest vacuum pump systems. It consists of a vacuum tank and pumping system as follows :

- (a) [vacuum drying tank] of internal diameter 5000mm, internal depth 3500mm and volume 60m³.
- (b) pumping system consisting of a main pump and its fore pumps, i. e.

Mechanical booster pump (3450 M³/hr) as a main pump and mechanical booster (1030 M³/hr)

Oil Rotary pump (3000 l/min) and Nash pump (4700 l/min) as fore pumps.

1. まえがき

最近の激増する電力需要に対し送電圧は高電圧化し、地下電力ケーブルにおいても同様年々高電圧ケーブルの開発実用化が進んでいる。超高電圧ケーブルの絶縁材料としては油浸紙が古くから紙用され、その優秀性と安定性は今なお他の新絶縁材料の追従をゆるさず今後ともその王座にあるものと思われる。含浸紙の優秀性と安定性を決定づけるものは絶縁紙および絶縁油の十分な脱気脱水によって発揮されるものである。従って油浸紙絶縁電力ケーブルの製造は乾燥技術とその装置が重要な役割をなすものである。乾燥方法としては古くから真空

乾燥が利用されて来たが、最近の真空技術の発展により、ケーブル乾燥に適した大容量の排気速度をもち、高い操作真空度で排気できる真空ポンプ類の出現により良質な効率のよい乾燥装置ができるようになってきた。ケーブルの真空乾燥装置を設計するに当たって重要なことは、ケーブル絶縁紙の含有水分量と電気特性、操作真空度(平衡蒸気圧)と絶縁紙の含有水分量などの相互関係

Fig. 1 Insulation resistance of the paper used in 130 kV single cable as a function of water vapour pressure (equilibrium) measured at 80°C.

を十分に検討し、さらにケーブル絶縁紙から放出して来る大量の水分に耐えうる真空ポンプ系を選択することである。数年前当社ではこれらを十分考慮したケーブル乾燥装置を設置した。このケーブル乾燥用排気系はこの

* 日本電線株式会社研究部 研究一課 (神奈川県川崎市古川通り65)

Fig 2 Loss factor (in an arbitrary dimension) of water content (or water vapour equilibrium pressure) of the paper used in the 20kV cable measured at 90°C.

Fig. 3 Cable Drying Tank.

Fig. 4 Vacuum pump Systems.

Fig. 5 Control Panel. Temperature and Vacuum Recording meter.

種の排気系としては大型のものに属し、かつ操作真空度が高く、排気能力の大きなもので設置以来満足な運転を行なっているので、その概要を報告する。

2. 絶縁紙の含有水分量と電気特性の関係

含浸紙のケーブルの電気性能すなわち絶縁強度、絶縁抵抗、静電容量、誘電正接などは構成絶縁材料である絶縁紙、絶縁油に含有する残留ガス、水分などによって左右される。これらの諸関係については古くから多くの研究者によって研究がなされてきた。(1)(2)(3)(4) それらについて Fig. 1⁽³⁾ に絶縁紙の Water Vapour Pressure (equilibrium) と絶縁抵抗の関係、Fig. 2⁽³⁾ に絶縁紙の (Water Vapour Pressure) と (Water Content) および (Loss factor) の関係を示した。

以上の種々のなされてきた研究を総合してみると絶縁紙の絶縁抵抗は Water Vapour Pressure (equilibrium) が工業的にみて 0.4~0.01 mmHg になったときに最もよい。絶縁紙の Loss factor は Water Vapour Pressure (equilibrium) が 10^{-1} mmHg より低くなるとほとんど変化しなくなる。さらに絶縁紙の含有水分量でいえば 0.1% 以下になれば

は電気的諸特性の変化がなくなってくる。従ってケーブルの真空乾燥としては絶縁紙の含有水分、Water Vapour Pressure, と電気特性の相互関係から考察すると 10^{-2} mmHg の操作真空度が必要となってくる。

3. 真空乾燥装置の概要

ケーブル乾燥タンクは蒸気加熱式で円筒型のもので内径 5000mm×深さ 3500mm 最高使用圧力 3 kg/cm² G, 使用温度最高 130°C で設計製作したものである。

タンクは全溶接鋼板製で溶接完了後全体焼鈍し歪を取り除き蓋のパッキン接触面の平行度を十分にとり、ここからのリークをすくなくするよう留意した。

真空排気系は乾燥タンクに絶縁紙量にして約 7000kg が charge されるのでその含有水分量約 700kg を蒸発処理させるものである。実際の乾燥処理としてはケーブルを 110°C に加熱し約 100hr で絶縁紙の最終の水蒸気分圧 10^{-2} mmHg, 含有水分量約 10^{-2} % 目標に設計したものである。このような大量の水分を処理する排気系としては水蒸気に対し機械的に全く強く、所要操作真空度範囲で十分な排気速度をもつ真空ポンプを要求することになる。さらに乾燥時の絶縁紙中の水分の拡散蒸発してくる過程を観察すると乾燥初期の水蒸気分圧の高い数 10mmHg までは水分の蒸発速度は非常に速くかつ含有水分量のほとんどを除去し、全乾燥工程からみれば数 10% の時間である。さらに最終の電気特性を得るための残留水分を除く数 10mmHg から 10^{-2} mmHg の水蒸気分圧下での水分の拡散は非常に緩慢になり、全乾燥工程からみれば半数以上の時間が費やされることになる。以上のような特性を考慮に置いて次のポンプ系列を撰択した。

- (1) 乾燥初期の大量の水分を処理する工程では水に全く強く機械的にも強固な Nash pump を選んだ。

Nash pump の性能；保土ヶ谷化学工業製、JE2121型、口径 65mm, 排気量 4.5m³/min, 回転数 1450 r.p.m, 電動機 11KW, 到達真空度 10~30mmHg (水温により)

- (2) 乾燥中期の 100mmHg 前後から約 10~20 mmHg において大容量の排気能力をもつ Mechanical Booster pump を用い、補助ポンプに Mechanical Booster pump さらにその補助に上記の Nash pump を用いる。

主 Mechanical Booster pump の性能；日本真空技術 K K 製、PMB-035 型、排気速度 3450m³/hr, ローター回転数 1400 r.p.m, バイパス弁作動真空度約 11mmHg, バイパス弁作動圧力差約 76mmHg, 所要電動機 15KW, 吸気口径 10inch, 排気口径 6 inch, 冷却水量 5 l/m (15°C), 到達真空度 0.4 μ Hg, 補助 Mecha-

- ① Drying tank (60m³ vacuum tank)
 ② Pneumatic valve ③ Mechanical booster pump (PMB-035)
 ④ Mechanical booster pump (PMB-010) ⑤ Rotary pump
 ⑥ Nash pump ⑦ Strainer
 ⑧ Blower ⑨ Heater

Fig.6 Schematic diagram of the vacuum drying system for cable.

nical Booster pump の性能；日本真空技術 K K 製、PMB-010型、排気速度 1032 m³/hr, ローター回転数 2100 r.p.m バイパス弁作動真空度約 10mmHg, バイパス弁作動圧力差約 42mmHg, 所要電動機 3.7 kW, 吸気口径 4inch, 排気口径 3 inch, 冷却水量 3 l/m (15°C) 到達真空度 0.4 μ Hg。

- (3) 乾燥終期の 10mmHg~ 10^{-2} mmHg においては大容量の排気能力をもたせるとともに到達真空度をのばし合せて Nash pump からの万一の逆拡散なども考慮し、Mechanical Booster pump の最終の補助ポンプを回転ポンプに切換える。回転ポンプの性能；日本真空技術 K K 製、P.K.S - 030型、排気速度 3250 l/m, 到達真空度 5×10^{-3} mmHg, 所要電動機 3.7kW, 以上の系統図を Fig.6 に示す。

真空測定系としては回転式マクラウド真空計、ピラニー真空計（二点式自動記録計付）、水銀マンメータ、ブルドン管、カイスラ管の各真空計を各真空ポンプ上、乾燥タンク上に取付け真空度に応じて使いわけている。

その他ケーブルの効率良く良質な乾燥を行なうには性能の良い排気系と、合せて乾燥に必要な温度を十分に均一に与える技術と方法が極めて重要な要素になる。そのため附帯設備として加熱乾燥空気発生装置（温度 120°C, 相対湿度 0.01% 以下、流量 2 m³/min）、脱湿装置（流

① : M. B (A) + M. B (B) + N. P

② : M. B (A) + M. B (B) + R. P

M. B (A) —Mechanical booster pump ; pumping speed 3450 M³/hr.

M. B (B) —Mechanical booster pump ; pumping speed 1032 M³/hr.

N. P—Nash pump ; pumping speed 4700 l/min

R. P—Rotary pump ; pumping speed 300 l/min

Fig. 7 Pump-down times vs. pressure curve.

- ① Leak valve ② Drying tank (60m³ vacuum tank)
- ③ Main valve ④ Mechanical booster pump(PMB—035)
- ⑤ Mechanical booster pump (PMB—010)
- ⑥ Nash pump ⑦ Rotary pump.
- ⑧ Bourdon gauge, Mercury manometer, Pirani gauge,
- ⑨ Mercury manometer, McLeod gauge, Pirani gauge.
- ⑩ Pirani gauge, ⑪ Bourdon gauge, ⑫ Pirani gauge.

Fig. 8 Schematic diagram of pumping speed test.

量 2 N m³/min, 露点 -60°C, 吸着剤シリカゲルソバビート N. W), 空気循環装置、ケーブル導体通電加熱用ターミナルなどがある。

以上の排気系と附帯設備などを乾燥工程の各段階で適宜組合せて乾燥速度の上昇を計っている。また乾燥タン

ク内のケーブルの各段階における乾燥状況を電気的特性の変化から測定できるように、各種ターミナルが附着している。

4. 真空排気系の特性

(1) 排気特性；空乾燥タンクをケーブル乾燥時の 120°C に昇温して置き上記の各真空ポンプを組合せた排気系で排気し排気時間—真空度の特性を測定したのが Fig. 7 である。Fig. 7 の測定値はブルドン管、水銀マノメーター、1mmHg 以下はピラニー真空計によったものである。到達真空度はピラニー真空計で 7×10^{-3} mmHg, マクラウド真空計で 3×10^{-3} mmHg である。

(2) 排気速度；排気速度の測定は実際のケーブル乾燥温度 120°C に乾燥タンクを昇温して置き Fig. 8 の回路を用いて測定した。タンクに取りつけた Leak Valve により任意の一定流量を送り込みながら乾燥タンク内を任意の真空度に保つ。真空度が一定になり安定した後各ポンプ前の真空度を測定する。しかるのちタンク前の Main Valve を閉じてタンク内の圧力上昇と要した時間を測定すればタンク内の内容積は既知であるから Leak Valve から漏ってきた流量 Q が算出できる。従って排気系を流れていた流量は Q と同じになるから各真空ポンプの排気速度は容易に計算できる。各真空ポンプの排気速度 S は

$$S = \frac{Q}{P} \dots\dots\dots (1)$$

の形で表わせる。上の(1)式から求めた各々の真空ポンプの $P-S$, $P-Q$ 曲線が Fig. 9 である。

(3) タンクの漏洩特性；乾燥タンクを数 10 時間 120°C で加熱しながら脱ガス後、圧力上昇法によりタンクの漏洩量を測定した。真空度の測定はピラニー真空計とマクラウド真空計の両者を用いて測定した。ケーブルの乾燥が 110°C を標準とするので、実際のケーブル乾燥時の乾燥度合の判断などに利用できるよう 120°C における漏洩量を求めた。ある時間 110°C で乾燥後真空排気を止めるとケーブル絶縁紙内に残留する水分はタンク内の空間に拡散して圧力上昇をする。これによって水蒸気分圧を推定し、絶縁紙内の含有水分量を推定しようとするためである。漏洩量の測定は十分タンク内を排気後タンクの排気口バルブを閉じて、真空度 P_1 を測定し、任意の時間経過後 (t) 再び真空度 P_2 を測定すれば次式により漏洩量 Q が算出できる。

- ① Mechanical booster pump (PMB-035 type 3450 M³/hr)
- ② Mechanical booster pump (PMB-010 type, 1032 M³/hr.)
- ③ Rotary pump (PKS-030 type, 3000 l/min)
- ④ Nashpump (JE-2121 type, 4700 l/min)

Fig. 9 Pumping speed curve (measured value on the set)

Cable type ; Conductor diam. : 15mm.
thickness of Insulation paper : 8mm
Overall diam : 31mm
Cable length : 1200m

Fig. 10 An example of cable drying (Pressure and throughput Q of water vapour vs. pump-times)

$$Q = \frac{V(P_2 - P_1)}{t} \dots \dots \dots (2)$$

但し、V：タンク内容積

ピラニー真空計により測定した結果の漏洩量は約 400~500 l μ s, マックラウド真空計で測定した結果は 350~450 l μ s 程度である。

(4) ケーブル乾燥の一例；実際にケーブルを乾燥した一例を次にあげてみる。ケーブルの構造は中心が銅撚線の導体でその上に 8mm の厚さの絶縁紙が巻かれている。導体の構成は 2.3mm の銅線で中心 1 本の上に 3 層の同心円に撚合せられた撚線である。絶縁紙はその撚線の上に厚さ 0.25mm で巾 17~20mm のリボン状のもので約 70 枚巻かれ絶縁体を形成している。仕上がったケーブルの外径は約 31mm である。このケーブルの条長は 1200m で、絶縁紙の重量は約 500kg、含有されている水分量約 40kg を真空乾燥させた結果である。均一になるような加熱操作と適当な真空度の排気とを組合せてできる限り短時間に大量の水分の除去と絶縁体の必要温度を加える操作を連続真空排気前に行う。

このような初期の乾燥操作のもの絶縁体を 110°C の均一な温度に保ちながら連続真空排気によって最終乾燥に至らしめた。真空排気中約 10 時間毎に排気口の Main Valve を閉じて圧力上昇法によりタンク内の Q 値を測定したのが Fig. 10 である。絶縁紙が排気中放出するガスの大部分はその中に含有する水分によるものであるから測定した Q 値は水蒸気の値と考え、工業的な絶縁紙乾燥中の含有水分量の推定には十分に利用できるものと考えている。

5. 特性の考察

(1) 排気特性；Nash pump のみでは 30~40mmHg が到達真空度で排気時間は 40~50min 要する。Nash pump から Mechanical Booster pump に切換え、補助ポンプに Nash pump を用いると、到達真空度は 1~2 mmHg であり、排気時間は約 1 時間要する。Mechanical Booster pump の補助ポンプを Rotary pump にした場合は、到達真空度は 5×10^{-3} mmHg で約 1 時間 20~30 分の排気時間が必要である。

以上の特性から実際のケーブル乾燥の排気には大気圧から数 100mmHg 迄は Nash pump を用い、次いで数 10mmHg 迄は Mechanical Booster pump の補助ポンプに Nash pump を用い、それ以後の補助ポンプとして Rotary pump を用いるのが、最も能率良い方法と考えられる。

(2) 排気速度：排気速度の測定には、タンクに排気系の接続された現場の設置そのままの状態で行ったが、推定値と比較的よく一致した。Nash pump の排気速度が小さめに測定されているのは、真空度測定に、フルトン管計を用いたため測定器自体の精度に問題があったためである。その他 Mechanical Booster pump, Rotary pump などについては推定値と実測値が、比較的良好一致していた。

(3) 漏洩特性：120°C で数十時間のガス出しによりタンクの漏洩量か、400 l μ sec 前後の値が得られた。パッキング関係も十分耐熱性をもつ材料を使用しているので、ケーブルの乾燥の如く長時間の排気を行う乾燥タンクであるから、乾燥タンクの漏洩量としては、500 l μ sec 程度を考えて置けばよいものと思われる。測定された漏洩量は使用した真空計の種類により異なり、ピラニ真空計とマクラウド真空計との間に差が生じている。これはタンク内に存在する残留圧縮性ガス（例えば、タンク内面に附着している僅かな油など）によるもの、真空計自体の感度（time lag）などによるものと考えられる。

(4) ケーブル乾燥の一例：Fig. 10 にケーブルの乾燥されて行く過程がよく示されている。排気を始めて約 10 時間程度で Q が急激に下降し、以後数 10hr 緩慢な下降を続けて、一定値に達している。乾燥タンク自体の Q が 400 l μ /sec 程度あるので乾燥終期の Q 値には、誤差が相当に含まれてくるので、最終点の判断は無理が多いが、排気後 70hr 前後で所期の含有水分量迄に乾燥されたことと思われる。なお参考に乾燥時の Q 測定時のピラニ計による全圧、マクラウド計による空気分圧と、空乾燥タンクの漏洩量などを用いて算出した絶縁紙の含有水分量は重量比で $10^{-2}\%$ が得られた。また、乾燥後取り出した絶縁紙試料のカルフィッシャー法によ

って求めた含有水分量（重量比）も $10^{-2}\%$ で期待の含有水分量には十分な値に達している。

6. 結 び

上記の乾燥装置はケーブルの乾燥排気系としては大型に属し、しかも新しく開発された真空ポンプ類の使用により期待通りに到達真空度が高く、操作排気能力の大きな特性をもっている。とくに過去においてケーブル乾燥の際、排気される大量の水分に悩まされてきた真空ポンプが、Nash pump を用いたことにより、この問題が無くなってきた。さらにケーブルの最終特性を決める 10^{-2} mmHg での排気をこの範囲で大きな排気量を誇る Mechanical Booster pump を用いたことによって乾燥時間が短縮できて、十分な乾燥ができるようになった。乾燥の過程において圧力上昇法による Q 値測定を行った結果は、製造工程管理上の絶縁紙の含有水分量の推定に十分利用できることが確認できた。以上の如く操作真空度が高く排気能力の大きな真空排気装置は、高電圧、超高電圧ケーブルの高能率の製造ができる確信をもっている。

最後に乾燥タンク真空排気系の設計製造測定に御協力下された日本真空技術 K K の関係者に深く感謝する次第である。

〔文 献〕

- (1) J.B. Whitehead. Impregnated Paper Insulation : John Wiley and Son Inc. 1935
- (2) A. King & V.H. Wentworth. Raw Materials for Electric Cable : Brnest Benn Ltd. 1954
- (3) G.W. Oetjen. Some Aspects and Developments of Vacuum Drying and Impregnation. (A.V.S Transactions of 4 th National Symposium on Vacuum Technology)
- (4) G. Wanser. Die Trocknung von Hochspannungskabeln in Hochvakuum (CEG-Berichte, april/Juni 1956)