

HIỆN TƯỢNG LÃO HÓA DẠNG "CÂY NƯỚC" TRONG VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN POLYME: NHỮNG ĐẶC ĐIỂM NHẬN DẠNG VÀ PHƯƠNG PHÁP TẠO "CÂY NƯỚC" TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM

NGUYỄN ĐÌNH THẮNG, VŨ THANH HẢI

I. MỞ ĐẦU

Lão hóa được hiểu như là sự biến đổi tính chất vật liệu theo thời gian, dưới tác động của môi trường: nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng, tia tử ngoại, oxy,... Polyme nói chung và polyethylene (PE) nói riêng là những vật liệu cách điện quan trọng nhất được sử dụng làm lớp vỏ cách điện trong công nghiệp chế tạo cáp điện lực và các thiết bị điện khác. Chúng có độ tổn hao cách điện tgđ thấp và độ bền cách điện cao. Kinh nghiệm vận hành thực tế và các thí nghiệm dài hạn trên các mô hình của cáp điện lực chôn ngầm dưới đất cho thấy một hiện tượng rất quan trọng là *nước khi kết hợp với một số yếu tố về môi trường xung quanh sẽ có tác động xấu tới các vật liệu cách điện của cáp lực thuộc nhóm polyolefine như PE và XLPE*. Nếu như sử dụng phương pháp nhuộm màu đúng cách ta có thể quan sát thấy những cấu trúc dạng cây (tree-like structures) ở trong lớp cách điện PE hoặc XLPE của cáp đang vận hành. Những cấu trúc này xuất phát từ những chỗ khuyết tật rất nhỏ của cách điện và phát triển theo hướng của điện trường. Hiện tượng rất phổ biến này được gọi là *cây nước* (water treeing) và nó khác về bản chất với *cây điện* (electrical treeing) do ion hóa: Hiện tượng cây nước này gắn liền với môi trường mà cáp vận hành làm suy yếu cách điện polymer của cáp tiến tới giai đoạn lão hóa, các cây điện sẽ được hình thành gây đánh thủng cách điện. Hiện tượng lão hóa XLPE kiểu cây nước lần đầu tiên được Myashita (Nhật Bản) [1] phát hiện ra năm 1969. Trong gần 35 năm nghiên cứu hiện tượng này đã có rất nhiều giả thuyết về cơ chế phát sinh - phát triển được đưa ra, nhưng cho tới tận ngày nay vẫn còn nhiều mâu thuẫn, chưa rõ ràng trong lý thuyết về cơ chế phát sinh và phát triển của cây nước do điều kiện phát sinh chúng rất đa dạng.

Việc nghiên cứu cơ chế phát sinh và phát triển của cây nước cũng như nghiên cứu phương pháp hạn chế tốc độ phát triển của chúng trong cách điện polymer của cáp điện lực có ý nghĩa quan trọng đối với các nhà sản xuất cáp và các công ty điện lực.

Bài báo này sẽ mở đầu cho một chuỗi các bài viết phân tích các kết quả nghiên cứu về dạng lão hóa cây nước do yếu tố môi trường ở vật liệu cách điện PE, polyethylene mật độ thấp (LDPE), polyethylene liên kết ngang (XLPE) cho cáp lực trung áp. Trong bài báo sẽ đưa ra các định nghĩa, nhận dạng của "cây nước", phân tích các thành quả nghiên cứu trên thế giới về cơ chế lão hóa do hiện tượng cây nước ở vật liệu cách điện bằng polymer nói chung và XLPE nói riêng cho tới thời điểm hiện tại và những vấn đề còn tồn tại cần giải quyết. Phương pháp tạo mẫu bị lão hóa dạng "cây nước" trong phòng thí nghiệm do tác giả áp dụng trong nghiên cứu đã cho những kết quả tốt làm cơ sở để phân tích về sự lão hóa của các polyme.

II. NGHIÊN CỨU VỀ HIỆN TƯỢNG LÃO HÓA DẠNG "CÂY NƯỚC" TRONG VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN POLYME

Cơ chế phát sinh phát triển của cây nước cho tới hiện nay vẫn chưa có được một lý thuyết nhất quán để giải thích một cách rõ ràng. Sự phát triển của cây nước bị ảnh hưởng của rất nhiều

yếu tố môi trường ngoài nước và điện trường, và quá trình này thường là phát triển trong một thời gian rất dài; do vậy, việc nghiên cứu hiện tượng lão hóa dạng cây nước ở cách điện XLPE của cáp lực là rất khó và đòi hỏi thời gian dài.

Một định nghĩa có tính tổng hợp [2] về hiện tượng lão hóa dạng cây nước có thể phát biểu như sau: những cây nước là cấu trúc lão hóa trong polyme có những tính chất:

- Chúng có tính vĩnh cửu, một khi đã tồn tại thì sẽ không bị biến mất đi trong mọi trường hợp.
- Cây nước phát triển được trong polyme ít nhất là do độ ẩm và trường điện.
- Khi trong trạng thái ướt, chúng có độ bền cách điện thấp hơn polyme không bị lão hoá, nhưng những cây nước không phải là lớp cách điện bị phá huỷ cục bộ và cũng không phải là đường ngắn mạch (short-circuit path).
- Những cây nước có độ thấm nước (hydrophilic) cao hơn polyme không bị lão hoá.

Những cấu trúc "cây nước" này có những đặc điểm "nhận dạng" sau:

- *Tính vĩnh cửu và thấm nước:* Những cây nước tồn tại vĩnh cửu trong lớp cách điện polyme. Chúng có thể được làm khô đi, nhưng khi đặt vào môi trường đủ độ ẩm ướt, những cây nước sẽ xuất hiện trở lại. Quá trình làm khô và cho ướt trở lại này có thể lặp đi lặp lại nhiều lần.

- *Khả năng có thể nhuộm màu:* Vì cây nước sau khi làm khô sẽ rất khó phát hiện trong XLPE, việc nhuộm màu cho cây nước đã được tiến hành từ rất sớm, gần như ngay sau khi các nhà nghiên cứu phát hiện ra hiện tượng cây nước. Từ đó đến nay, đã có rất nhiều phương pháp nhuộm màu được phát triển và sử dụng. Hiện tại, phương pháp tiêu chuẩn để nhuộm màu cây nước đã được tổ chức CIGRE đưa ra với việc sử dụng chất nhuộm là Methylene Blue (thuốc tím).

- *Hàm lượng nước chứa trong cây nước:* Do quá trình lão hóa tự nhiên, nước sẽ khuếch tán vào polyme với một lượng nhất định trong điều kiện có hoặc không có các vật thấm nước trong đó. Chẳng hạn, hàm lượng nước trong PE vào khoảng 100 ppm tại dải nhiệt độ môi trường từ 20°C đến 50°C khi PE ở trong trạng thái cân bằng (equilibrium state); hàm lượng nước trong vỏ cách điện XLPE của cáp lực vào khoảng 200 ppm. Hàm lượng nước trong các cây nước so với hàm lượng nước trong PE sẽ cao hơn khoảng 100 lần. Chủ yếu chúng tồn tại dưới dạng lỏng trong các lỗ cây nước.

- *Các lỗ rỗng, kênh và đường dẫn:* Theo các nhà nghiên cứu [3], cây nước bao gồm cả lỗ rỗng, kênh và đường dẫn tùy thuộc vào cấu trúc vật liệu polyme và môi trường làm sinh ra chúng.

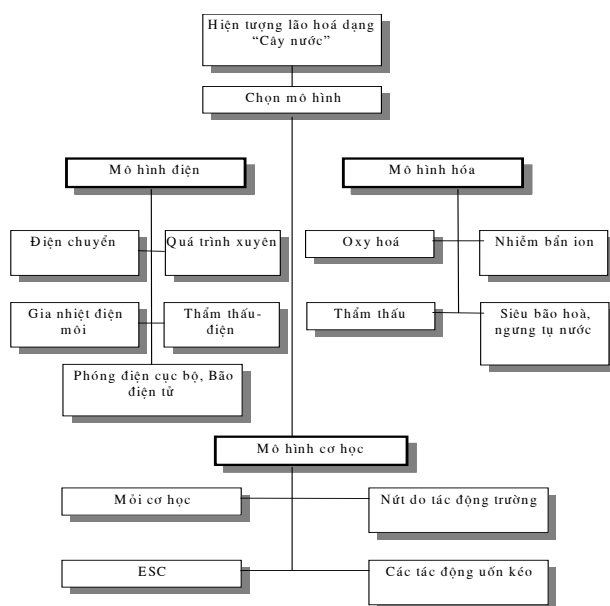
Các đặc tính điện môi của cây nước: Trong trạng thái ướt cách điện có hằng số điện môi ϵ_r lớn hơn; tg δ có xu hướng tăng ở những cây nước mặc dù không thể coi cây nước như là kênh dẫn điện. Chẳng hạn, polyethylene (PE) có tg δ vào khoảng 0,0005, trong khi tg δ của cây nước trong PE có giá trị vào khoảng 0,002.

Ở cách điện bằng polyme có nhiều cây nước trong trạng thái ướt, độ bền cách điện sẽ giảm sút nhiều và nó sẽ phụ thuộc vào sự phát triển của cây nước. Mặc dù vậy, cây nước không phải là đường ngắn mạch, nó vẫn còn giữ được tính chất cách điện ở một mức độ nhất định được thể hiện qua giá trị tg δ không lớn (tg δ cây nước = 0,002) ở điện áp vận hành.

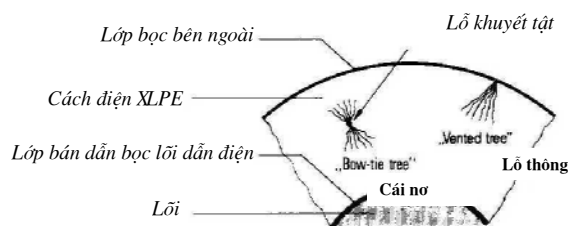
Hiện tại, quan điểm phổ biến nhất về mô hình phát triển của lão hóa dạng cây nước là phân lập các mô hình ra làm 3 dạng chính do chưa tìm ra được cơ chế nhất quán về sự phát triển của cây nước. Đó là các mô hình điện, hóa học và cơ học.

Xét về cấu tạo và hình dạng của cây nước có thể chia làm hai dạng chính: dạng lỗ thông

(vented trees) phát triển từ lớp bán dẫn trong cáp và dạng hình cái nơ (bow-tie trees) phát triển từ những bọt không khí khuyết tật trong lớp cách điện polyme của cáp hoặc những chỗ khuyết tật do công nghệ chế tạo cáp.



Hình 1. Các mô hình phát triển lão hóa dạng cây nước



Hình 2. Các dạng cây nước phát sinh trong lớp cách điện polyme cáp điện lực

III. PHƯƠNG PHÁP TẠO MẪU LÃO HÓA DẠNG CÂY NƯỚC TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM

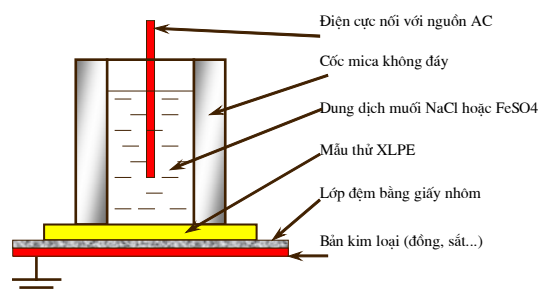
Lão hóa dạng cây nước trong lớp cách điện polyme cáp điện lực do ảnh hưởng môi trường và trường điện từ là một dạng lão hóa có quá trình phát triển chậm. Như các nghiên cứu^[3] đã chỉ ra, để có mẫu lão hóa dạng cây nước lấy từ lớp cách điện cáp điện lực đang vận hành thì thời gian vận hành cần thiết phải từ mười năm trở lên. Trong công tác nghiên cứu, một trong những yếu tố quyết định là thời gian thí nghiệm để cuối cùng đưa ra kết quả và các nhận định, đánh giá. Vì vậy, đã có nhiều phương pháp tạo mẫu lão hóa dạng cây nước trong phòng thí nghiệm được đề xuất trong suốt hơn 35 năm nghiên cứu hiện tượng này nhằm rút ngắn thời gian hình thành cây nước trong cách điện polyme. Những phương pháp đó gọi chung là phương pháp tạo mẫu lão hóa kiểu tăng tốc (accelerated experiment). Theo phương pháp này, mẫu cáp hoặc mẫu vật liệu polyme được đưa vào môi trường khắc nghiệt như điện áp cao, tần số cao, nhiệt độ và độ ẩm cao và cho tiếp xúc trực tiếp với các dung dịch hóa chất như muối nhằm đẩy nhanh quá trình hình thành và phát triển cây nước, từ đó quan sát và phân tích các thông số của chúng. Phương pháp này được lợi về mặt thời gian và cho phép các nhà nghiên cứu thu thập được các mẫu cây

nước đa dạng phục vụ công tác nghiên cứu.

Trong nghiên cứu, tác giả và các cộng sự đã tiếp cận phương pháp tăng tốc và đề xuất một hướng mới trong việc tạo mẫu lão hóa dạng cây nước trong lớp cách điện polyme của cáp điện lực với mong muốn nghiên cứu, phân tích dạng thù hình, các đặc tính điện môi, dòng rò của cách điện polyme bị lão hóa. Đó là phương pháp tạo mẫu lão hóa cây nước *dạng lỗ thông xuyên thấu (penetrated vented water treeing)* [4]. Với phương pháp này, các "cây nước" được tạo ra sẽ xuyên hết chiều dày của lớp màng polyme (LDPE hoặc XLPE) được dùng làm cách điện cho cáp lực. Quy trình được thực hiện như sau:

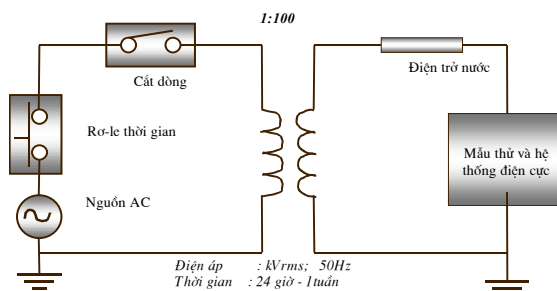
- *Vật liệu sử dụng*: màng polyethylene mật độ thấp (LDPE: low density polyethylene) có các độ dày khác nhau từ 40 đến 100 μm , mẫu polyethylene với liên kết ngang (XLPE: crosslinked polyethylene) có độ dày 100 μm .

- *Xử lý mẫu vật và sắp đặt thiết bị thí nghiệm*: Các tấm màng polyme được cắt thành các mẫu thử nghiệm hình vuông với các kích thước đa dạng (40 mm $\times$ 40 mm; 60 mm $\times$ 60 mm,...). Sau khi làm sạch, mẫu được đánh ráp nhẹ bề mặt bằng giấy ráp cỡ #1500. Để tạo ra điện trường cao và tạo môi trường tác động vào mẫu thử nghiệm (mô phỏng quá trình lão hóa cách điện cáp lực đang vận hành chôn ngầm trong lòng đất), mẫu được cho tiếp xúc trực tiếp với dung dịch muối bão hòa NaCl hoặc FeSO_4 trong khi chịu tác động của điện áp cao (1 – 3 kV) trong thời gian từ 24 giờ tới 168 giờ (1 tuần). Để thực hiện quá trình này, nhóm tác giả đã sử dụng hệ điện cực dung dịch muối - bản kim loại loại với mẫu thử kẹp ở giữa bằng epoxy như hình 3.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý thí nghiệm lão hóa tăng tốc sử dụng hệ điện cực dung dịch muối – bản kim loại

Để tạo "cây nước" dạng lỗ thông bình thường (vented water trees), mẫu thử là màng polyme như đã mô tả ở trên và chỉ có một lớp duy nhất. Còn để tạo ra mẫu lão hóa với cây nước dạng lỗ thông xuyên thấu, mẫu thử sẽ bao gồm 2 lớp màng polyme được đặt dưới hệ thống điện cực. Sau đó, mẫu vật được đưa vào mạch thử nghiệm với nguồn điện áp cao (1 - 3 kV) tần số 50 Hz trong những khoảng thời gian khác nhau từ 24 giờ tới 1 tuần (7 ngày) để phát sinh cây nước.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý thí nghiệm độ lão hóa dạng cây nước

Sau khi kết thúc thí nghiệm, với mục đích hiện hình dạng cây nước khi cho quan sát trên kính

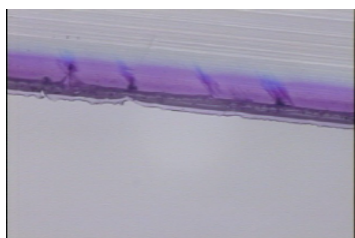
hiển vi, các mẫu lão hóa được đưa vào ngâm trong dung dịch thuốc tím với 10% amoniac trong vòng 24 giờ [5]. Đối với thí nghiệm tạo mẫu cây nước dạng xuyên thấu, chỉ lấy lớp phía trên, nơi có tiếp xúc với dung dịch muối và cũng là nơi xuất hiện các cây nước dạng xuyên thấu. Những mẫu lão hóa này sẽ được sử dụng cho các phân tích, thử nghiệm về lão hóa dạng cây nước như: thí nghiệm về hiện tượng phát nhiệt, các thí nghiệm về đo dòng rò, các đặc tính điện môi, các thí nghiệm về độ bền cách điện của mẫu bị lão hóa v.v...

IV. KẾT QUẢ QUAN SÁT MẪU LÃO HÓA DẠNG CÂY NƯỚC

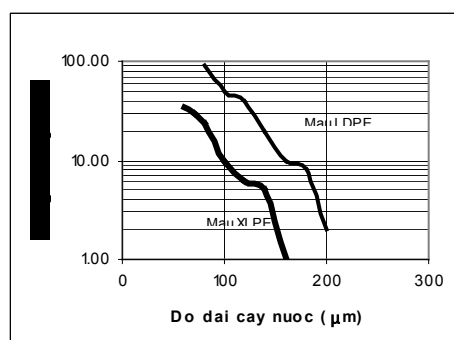
Mẫu vật sau khi được xử lý sẽ được tiến hành quan sát trên kính hiển vi để phân tích các thông số của cây nước như: mật độ cây nước phát triển trong mẫu, hình dạng và chiều dài cây nước.

Sử dụng phương pháp tăng tốc như đã mô tả ở trên tại phòng thí nghiệm cao áp và hiệu ứng các điện trường cao tại trường Đại học Khoa học Kỹ thuật Toyohashi, Nhật Bản đã thu được bộ dữ liệu mẫu lão hóa dạng cây nước trên vật liệu polyme dùng cho cách điện cáp điện lực.

Qua quan sát trên kính hiển vi mẫu LDPE có độ dày 100 μm , cây nước có độ dài dài nhất vào khoảng 40 μm , phần lớn các cây nước có độ dài trung bình từ 10 - 20 μm .

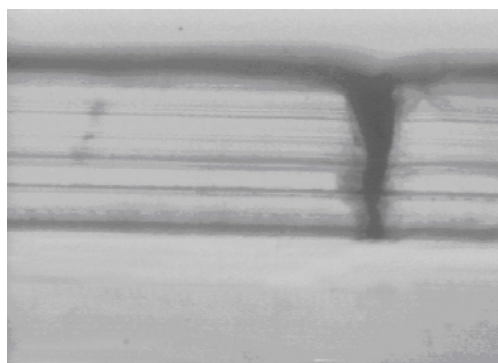


Hình 5. Cây nước trên lát cắt LDPE được nhuộm màu bằng thuốc tím



Hình 6. Đồ thị phân bố độ dài cây nước

Để phân tích về độ dài cây nước tồn tại trong mẫu, các tác giả đã phân tích 2 mẫu thử là màng LDPE và XLPE có độ dày 500 μm đã qua quá trình lão hóa, đo qua kính hiển vi số lượng và độ dài cây nước và xây dựng đường phân bố độ dài của các cây nước quan sát được (hình 6). Các đường phân bố cho thấy đặc tính về sự phát triển của cây nước tại các mẫu thử là giống nhau; chúng chỉ khác nhau về số lượng và chiều dài các cây nước có trong từng mẫu do mẫu khác nhau về cấu trúc hóa học. Hình dạng của cây nước dạng xuyên thấu được quan sát qua kính hiển vi và thể hiện trên hình 7.



Hình 7. Hình dạng cây nước dạng xuyên thấu trong lớp màng LDPE

V. NHẬN XÉT CHUNG VÀ KẾT LUẬN

Hiện nay trên lưới điện trung áp, việc sử dụng cáp ngầm đã trở nên phổ biến. Khả năng tải của cáp phụ thuộc vào suất nhiệt trở của môi trường lắp đặt, nhiệt độ môi trường xung quanh, độ chôn sâu cáp, khoảng cách lắp đặt giữa các cáp. Hay nói cách khác là trong công tác quy hoạch thiết kế lưới điện sử dụng cáp ngầm việc xác định rõ các điều kiện môi trường, khí hậu; các thông số kỹ thuật như điện trở nhiệt của vật liệu lắp rãnh cáp, cách thức lắp đặt cáp điện sẽ quyết định đến việc vận hành an toàn ổn định và quyết định tuổi thọ của cáp.

Đối với cáp điện lực cách điện polyme, nguyên nhân của một số sự cố đường cáp là do hậu quả của quá trình lão hóa với cơ chế chính là hiện tượng lão hóa dạng cây nước do tác động của môi trường. Qua một thời gian vận hành, những cây nước tồn tại trong cách điện cáp phát triển thành những kênh dài, có khi nối hết cả bề dày cách điện. Vì có những cây nước như vậy cho nên độ bền cách điện của lớp cách điện polyme bị suy giảm rõ rệt, khi có xung điện áp tác động thì xác suất đánh thủng cách điện tại những khu vực có cây nước là rất cao. Có thể nhận định rằng lão hóa dạng cây nước phát triển mạnh trong điều kiện khí hậu nóng ẩm và mưa nhiều của Việt Nam; vì vậy, việc nghiên cứu hiện tượng này là một việc cần thiết nhằm mục đích cuối cùng là đưa ra những biện pháp ngăn ngừa hữu hiệu quá trình lão hóa do cây nước trong vận hành các tuyến cáp cũng như trong quá trình sản xuất cáp lực.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ là một số nội dung chính sau:

- Hiện tượng phát nhiệt trong mẫu thử nghiệm và đo dòng rò trong mẫu.
- Độ bền cách điện của mẫu lão hóa phụ thuộc theo độ ẩm môi trường xung quanh.
- Ảnh hưởng của các chất độn trong cấu trúc hóa học polyme lên độ lão hóa dạng cây nước của vật liệu.

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, đề xuất những cải tiến, đổi mới về mặt công nghệ sản xuất cáp lực liên quan tới cách điện polyme nhằm tăng khả năng chịu tác động của môi trường vận hành.

Lời cảm ơn. Các tác giả xin bày tỏ sự biết ơn của mình tới GS.TS. Nagao Masayuki và GS.TS. Hozumi Naohiro - Trường Đại học Khoa học Kỹ thuật Toyohashi, Nhật Bản đã tận tình giúp đỡ và tạo điều kiện để thực hiện một số thí nghiệm về sự hình thành cây nước, yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến tuổi thọ của cách điện XLPE.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. T. Myashita - Deterioration of Water-immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing, Proceeding 1969 IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston, Sep. 1969, tr.131-135.
2. Robert Ross - Inception and Propagation Mechanism of Water Treeing, IEEE Trans. on EI, **5** (5) (1998) 660-665.
3. Minema, H.A. Barneveld, and P.D. Rinkel - An Investigation into Mechanism of Water Treeing in PE HV Cables, IEEE Trans. EL **15** (6) (1980) 416-472.
4. Hai Vu Thanh, M. Nagao, N. Hozumi, and Y. Mutamoto - Proc. Japan IEE 2000 – 2002 (tiếng Nhật).
5. P. B. Larsen - Dyeing Methods Used for Detection of Water Trees In Extruded Cables Insulation, Electra **86** (1983) 53-59.

6. Jean-Pierre Crine - Electrical, Chemical and Mechanical Processes in Water Treeing, IEEE Trans. EL **5** (5) (1998) 682-694.
7. E.T. Larina - Cáp cao áp và đường dây cao áp, Energoizdat, Matxcova, 1984 (tiếng Nga).
8. Võ Viết Đan - Kỹ thuật điện cao áp, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1972.
9. Nguyễn Đình Thắng, Vật liệu kỹ thuật điện, NXB Khoa học kỹ thuật, 2004.

SUMMARY

WATER TREEING PHENOMENON IN POLYMERIC INSULATION MATERIAL FOR POWER CABLE: CHARACTERISTICS AND METHOD OF PREPARING AGING SAMPLE IN LABORATORY

This paper describes the water treeing phenomenon in polymeric insulation layer of power cable. This aging process is a complex phenomenon involving several processes with many synergistic effects. Although a huge number of studies on the subject have been conducted over the last 35 years, there is no comprehensive theory able to describe the mechanism of water treeing phenomenon. In fact, water treeing is likely to be a mixture of electrical, mechanical and chemical processes. In order to investigate water treeing phenomenon, the method of preparing aging samples with penetrated vented water trees in laboratory was developed. The shape, configuration and length of water trees in those aging samples were analyzed.

Key Words: Vented Water Tree, Penetrated Water Tree, Low Density Polyethylene, Crosslinked Polyethylene

Địa chỉ:

Nhận bài ngày 22 tháng 3 năm 2005

Nguyễn Đình Thắng, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Vũ Thanh Hải, Viện Năng lượng, Tổng Công ty Điện lực Việt Nam.