

CURS 1. Sisteme de izolație – funcții – solicitări – componente - structură

1. Noțiuni generale

Def. Sistemele de izolație electrică, numite adesea și scheme de izolație sau, simplu izolații, reprezintă părți constructive ale mașinilor electrice, transformatoarelor și a altor echipamente electrice (întrerupătoare, comutatoare, cabluri de energie, izolatoare etc.) alcătuite dintr-un singur material electroizolant sau un ansamblu de materiale electroizolante, aflate în contact direct cu părțile conductoare ale acestora.

Sistemele de izolație electrică, notate SI, constituie părți ale instalațiilor și echipamentelor electrice care influențează într-o foarte mare măsură funcționarea și durata de exploatare a acestora. Rolul principal al sistemelor de izolație este acela de a asigura izolarea electrică a diverselor părți conductoare, aflate la potențiale electrice diferite. Orice echipament electric are în componența sa un sistem de izolație care, odată străpuns, face imposibilă funcționarea echipamentului în cauză. Sistemele de izolație sunt practic singurele părți componente ale echipamentelor electrice care limitează tensiunea nominală U_n și temperatura de funcționare a acestora.

2. Structura SI

În funcție de natura echipamentului electric, sistemele de izolație pot avea o structură simplă, fiind realizate dintr-un singur material electroizolant (gaz, lichid sau solid), sau o structură mai complexă, în acest caz fiind alcătuite din mai multe materiale electroizolante, cu structuri și/sau stări de agregare diferite.

Concepția și realizarea practică a sistemelor de izolație sunt strâns legate de formele geometrice ale căilor de curent, dar, și de natura și starea fizică a materialelor electroizolante utilizate. Pentru îndeplinirea funcțiilor de bază, sistemele de izolație sunt alcătuite din materiale cu rezistivitate electrică foarte mare ($\rho = 10^6 - 10^{18} \Omega m$), având o lățime a benzii interzise Fermi cuprinsă între 5 și 9 eV.

În etapele de elaborare a sistemelor de izolație ale echipamentelor electrice trebuie avute în vedere unele aspecte fundamentale printre care amintim:

- dimensionarea cât mai bună a izolației electrice în vederea reducerii costurilor echipamentelor (din acest punct de vedere izolația trebuind să fie utilizată la solicitări foarte apropiate de solicitările maxime admisibile);
- menținerea ratei de străpungere a izolațiilor sub valorile acceptate de utilizatorii echipamentelor electrice;
- realizarea unor izolații noi, cu proprietăți superioare celor existente, care să facă posibilă fabricarea unor echipamente electrice cu valori ale tensiunii din ce în ce mai mari.

În mod deosebit, în ultima perioadă aceste aspecte trebuie să fie coroborate și cu o serie de restricții referitoare la protecția mediului înconjurător și de anumite exigențe legate de locul de amplasare a echipamentelor electrice (clădiri, centrale nucleare, rețele electrice speciale, etc.). Norme recente prevăd reducerea sau chiar suprimarea poluanților datorati dispersiei izolatorilor gazoși, lichizi sau solizi în natură sau arderii acestor materiale (fenomen ce poate conduce la formarea unor produși toxici sau corozivi). Nu în ultimul rând, un aspect important ce trebuie luat în considerare la realizarea sistemelor de izolație vizează costurile energetice. Tehnologiile de fabricație a sistemelor de izolație trebuie să fie bazate pe consumuri de energie cât mai mici posibil.

3. Funcțiile și solicitările sistemelor de izolație

Pe lângă principala funcție de izolare electrică a părților metalice ale mașinilor și echipamentelor electrice, sistemele de izolație mai îndeplinesc și alte funcții printre care amintim:

- suport mecanic pentru conductoare;
- mediu de transmitere și evacuare a căldurii rezultate ca urmare a producerii pierderilor de energie în părțile active ale echipamentelor electrice;
- izolarea echipamentelor față de mediul exterior.

În consecință, realizarea și dimensionarea izolației electrice a unui echipament implică, în primul rând, cunoașterea cât mai exactă a modului de funcționare a acestuia și a particularităților locului în care va fi exploatat. Prin urmare, alegerea materialelor ce compun sistemul de izolație se va face ținând cont de toate funcțiile pe care acesta le va îndeplini în cadrul echipamentului.

Strâns legat de funcțiile îndeplinite, sistemele de izolație sunt supuse unor solicitări electrice, mecanice, termice, datorate radiațiilor sau mediului ambiant. Deși solicitările care apar în timpul funcționării echipamentelor electrice sunt cele mai importante, semnalăm faptul că și în procesul de fabricație există, de asemenea, solicitări care acționează asupra izolațiilor. În funcție de natura lor, există solicitări de scurtă sau lungă durată, permanente (sau de exploatare) sau accidentale (caracteristice unor regimuri de funcționare anormale a echipamentelor), constante sau variabile în timp.

În funcție de intensitățile solicitărilor dar și de intervalele de timp în care se

exercită, efectele lor asupra stării izolațiilor pot fi mai mult sau mai puțin importante. În practică, sistemele de izolație nu se deteriorează deodată. Astfel, sub acțiunea diverselor tipuri de solicitări, sistemele de izolație suferă transformări structurale ireversibile, care, aproape în toate cazurile, provoacă înrăutățirea proprietăților, deci, determină degradarea lor în timp, adică îmbătrânirea. Îmbătrânirea sistemelor de izolație se reflectă cel mai bine în modificarea caracteristicilor electrice și mecanice ale acestora. În acest sens, un exemplu îl constituie scăderea valorii rigidității electrice, creștea factorului de pierderi și reducerea valorilor alungirii relative la rupere. În consecință, solicitările izolațiilor, care determină îmbătrânirea acestora, conduc la înrăutățirea fiabilității izolației electrice, și deci, la creșterea ritmului de defectare în timp a echipamentelor electrice.

4. Componentele sistemelor de izolație

Materialele electroizolante folosite la realizarea sistemelor de izolație ale echipamentelor electrice ocupă o gamă foarte largă, de la produse naturale, vegetale și minerale, izolanți sintetici și până la cele mai noi materiale obținute prin tehnologii foarte avansate (nanotehnologii). În ceea ce privește evoluția sistemelor de izolație în decursul timpului, o scurtă trecere în revistă a acestora arată foarte clar că structura și materialele utilizate la fabricarea izolațiilor corespund nivelului cunoașterii științifice și tehnologice din perioadele de timp respective.

În ceea ce urmează se vor prezenta principalele categorii de materiale electroizolante folosite la realizarea sistemelor de izolație.

4.1. Clasificarea în funcție de starea de agregare

În funcție de starea de agregare, materialele electroizolante utilizate la realizarea sistemelor de izolație sunt grupate în trei categorii:

- materiale electroizolante gazoase;
- lichide electroizolante;
- materiale electroizolante solide.

Dintre gazele utilizate în sistemele de izolație, cel mai răspândit este aerul (ca izolanți sau impurități), având proprietăți dielectrice satisfăcătoare pentru valori moderate ale intensității câmpului electric. De asemenea, hidrogenul, azotul, gazele electronegative, ș.a. sunt folosite în realizarea schimelor de izolație ale echipamentelor electrice.

Din grupa materialelor electroizolante lichide fac parte uleiurile electroizolante naturale (uleiul mineral, de ricin) sau sintetice (clorurate, fluorurate, siliconice), dar și anumite hidrocarburi utilizate ca solvenți pentru lacurile electroizolante. Materialele electroizolante solide constituie o grupă foarte vastă care va fi prezentată mai jos.

4.2. Clasificarea după domeniul de utilizare

Acest criteriu de împărțire a materialelor electroizolante este mai puțin folosit deoarece același material poate avea mai multe utilizări. Totuși, există câteva grupe de materiale printre care amintim:

- materiale pentru realizarea izolației dintre straturile înfășurărilor;
- materiale pentru realizarea izolației de creștătură;
- materiale pentru izolarea capetelor de bobină;
- materiale de impregnare;
- materiale de acoperire.

4.3. Clasificarea după compoziția chimică

În general, componentele sistemelor de izolație se împart, după structura lor chimică, în trei grupe principale [1,2]:

- materiale organice;
- materiale anorganice;
- materiale siliconice (sau de trecere).

Materialele electroizolante organice prezintă proprietăți dielectrice și mecanice bune dar proprietăți termice inferioare celor anorganice. Din categoria materialele organice fac parte cele micromoleculare cum ar fi cerurile și substanțele ceroase, bitumurile și asfalturile. Printre materialele organice macromoleculare amintim rășinile naturale (șelacul, colofoniul și rășinile fosile), celuloza și derivații acesteia (triacetat de celuloză, benzil-celuloză, ș.a.), cauciucul natural, etc. Un loc foarte important în grupa materialelor electroizolante organice macromoleculare este ocupat de rășinile sintetice (de polimerizare, de policondensare și de poliadiție). Dintre acestea cele mai utilizate sunt polietilena, polipropilena, policlorura de vinil, politetrafluoretilenă, tereftalatul de polietilenă, ș.a.

Materialele anorganice prezintă un rol determinant în realizarea sistemelor de izolație ale echipamentelor electrice care funcționează la temperaturi mai ridicate [2]. Materialele anorganice pot fi utilizate la temperaturi de peste 200 °C fără a-și schimba caracteristicile de bază. Aceste materiale nu se oxidează, nu se carbonizează și prezintă o bună rezistență la acțiunea arcului electric și a radiațiilor. În raport cu materialele electroizolante organice, materialele anorganice prezintă proprietăți mecanice inferioare (rezistență la tracțiune și rezistență la încovoiere reduse). Acesta este motivul principal pentru care în sistemele de izolație, materialele anorganice sunt folosite împreună cu cele organice. În grupa materialelor electroizolante anorganice un loc foarte important este ocupat de mica și produsele pe bază de mică (hârtia de mică, micalexul, micanitele și

micafoliile). Sticlele anorganice, ceramica electrotehnică, azbestul (folosit numai în cazuri speciale datorită acțiunii sale cancerigene), azbocimentul, rocile electroizolante (marmura, ardezia, talcul), oxizii metalici și materialele refractare sunt de asemenea materiale anorganice folosite la realizarea sistemelor de izolație ale echipamentelor electrice.

Materialele siliconice sunt compuși ai siliciului și se obțin prin completarea valențelor libere ale lanțului siloxanic cu radicali organici. Ca urmare a acestei structuri, proprietățile lor îmbină caracteristicile electrice foarte bune ale materialelor organice cu stabilitatea chimică și termică mare care caracterizează materialele anorganice. Siliconii rezistă foarte bine la temperaturi ridicate (200 °C), sunt neinflamabili și nehidrogscopici, nu dezvoltă gaze toxice și aderă foarte bine la suprafețele metalice. În funcție de structura lor moleculară, materialele siliconice se prezintă sub formă de uleiuri sau unsori (cu molecule scurte și arborescente), cauciucuri (cu molecule liniare unite prin punți de legătură) și rășini (rețele moleculare). Pe lângă proprietățile dielectrice și termice foarte bune, materialele siliconice au o aderență foarte bună atât în cazul unor materiale electroizolante precum sticlele și ceramicile cât și în cazul metalelor (fiind utilizate și pentru fabricarea lacurilor de acoperire necesare realizării sistemelor de izolație pe bază de fibre de sticlă, mică, etc.). Rășinile siliconice au o largă utilizare în realizarea sistemelor de izolație ale mașinilor electrice de puteri mari și tensiuni înalte datorită bunei rezistențe la acțiunea descărcărilor parțiale. Nu în ultimul rând, siliconii sunt utilizați și ca material de adaos în compozițiile de presare (pentru evitarea lipirii pieselor de matrițe), ca aditiv pentru cauciucurile sintetice, la fabricarea compoundurilor, etc.

4.4. Clasificarea după stabilitatea termică

Stabilitatea termică reprezintă capacitatea materialelor electroizolante de a rezista timp îndelungat la o anumită temperatură, fără ca proprietățile lor (electrice, mecanice, etc.) să scadă sub o valoare limită, după care materialele nu-și mai pot îndeplini rolul în sistemul de izolație al echipamentului electric. Clasificarea materialelor electroizolante se realizează în urma unor *teste de duranță*. Acestea presupun îmbătrânirea termică a materialului și stabilirea dependenței dintre intervalul de timp necesar pentru atingerea criteriului de sfârșit de viață și valoarea temperaturii de îmbătrânire.

În anul 1954 *Comisia Electrotehnică Internațională* (CEI) a stabilit împărțirea materialelor electroizolante în funcție de stabilitatea termică, introducând șapte clase de izolație (tabelul 1.1)

În general, pentru clasificarea termică a sistemelor de izolație, au fost introduse și alte criterii. Conform CEI 60085 evaluarea stabilității termice (clasei termice) a unui SI se face prin comparație cu un material, numit adesea material de control, a cărei rezistență la acțiunea temperaturii este cunoscută.

În acest sens, se definește *indicele de anduranță termică evaluată* (ATE) care reprezintă valoarea numerică a temperaturii, exprimată în grade Celsius, până la care materialul de control prezintă proprietăți și caracteristici satisfăcătoare pentru o anumită aplicație. Se definește *indicele de anduranță termică relativă* (RTE) care reprezintă valoarea numerică a temperaturii exprimată în grade Celsius, pentru care durata de viață estimată a izolatorului sau sistemului de izolație este aceeași cu durata de viață estimată a materialului de control obținută pentru o temperatură egală cu anduranța termică evaluată (ATE). Pe baza acestor considerente, materialele

Tabelul 1.1. Clasificarea materialelor electroizolante după stabilitate termică

Clasa de izolație	Materiale electroizolante
Y 90°C	materiale textile (din bumbac, mătase naturală, fibre de celuloză și poliamidice), hârtii și cartoane electroizolante, lemn, etc. polietilenă, polistiren, policlorura de vinil, cauciucul natural vulcanizat mase plastice de formare cu umplutură organică.
A 105°C	materiale textile (pe bază de bumbac, mătase naturală, celuloză, poliamide), lemn, hârtii și cartoane, etc. pelicula izolantă a conductoarelor izolate cu emailuri poliamidice, rășini poliamidice, folii de triacetat de celuloză, folii poliamidice și materiale combinate de tipul carton – folie; lacuri uleioase și rășinoase, lichide electroizolante.
E 120°C	pelicula izolantă a conductoarelor emailate cu lacuri polivinil acetice, poliuretanice sau epoxidice; rășini epoxidice, poliesterice și poliuretanice; folii și fibre și țesături de tereftalat de polietilenă; lacuri pe bază de rășini alchidice și ulei.
B 130°C	materiale pe bază de mică sau hârtie de mică, fără suport sau cu suport din hârtie sau țesături organice; materiale pe bază de fire și țesături de sticlă impregnate; mase plastice de formare cu umplutură anorganică și materiale stratificate pe bază de sticlă; pelicula izolantă a conductoarelor emailate cu lacuri polietilentereftalice; lacuri epoxidice, poliuretanice, pe bază de rășini alchidice modificate.
F 155°C	materiale pe bază de mică sau hârtie de mică, stratificate, fără suport sau cu suport anorganic; izolații din fibre de sticlă, țesături și tuburi flexibile din sticlă impregnate, stratificate pe bază de fibre de sticlă; rășini siliconice modificate, rășini alchidice, epoxidice, cu stabilitate termică corespunzătoare.
H 180°C	materiale pe bază de mică, fără suport sau cu suport anorganic; fire și țesături de sticlă impregnate; mase plastice de formare cu umplutură anorganică; elastomeri siliconici fără suport sau cu suport anorganic; rășini și lacuri siliconice.

C >180°C	materiale anorganice (mică, sticlă, ceramici, ardezie, micalex); materiale pe bază de mică, fără suport sau cu suport din fibre de sticlă; politetrafluoretilena; compuși anorganici și rășini siliconice cu stabilitate termică peste 225°C.
-------------	--

electroizolante și sistemele de izolație sunt clasificate în funcție de intervalele de valori ale indicelui RTE în zece clase termice (vezi tabelul 1.2 în care se prezintă și corespondența dintre noile clase termice și clasele de izolație) [5].

Conform standardelor în vigoare, clasificarea materialelor electroizolante în funcție de stabilitatea lor termică nu poate fi aplicată unui sistem de izolație care nu conține în structura sa materialele respective. De asemenea, clasificarea termică a unui material izolant nu poate fi dedusă plecând de la clasa de izolație a unui sistem de izolație care nu conține materialul respectiv. Clasa termică a unui material component al unui sistem de izolație nu poate fi, în general, desemnată ca fiind clasa termică a întregului SI.

În prezent, pe plan mondial, se preferă utilizarea claselor termice (clasa 105 °C sau clasa 200 °C) pentru clasificarea materialelor și sistemelor electroizolante. Spre exemplu, un material din clasa termică 155 °C trebuie să aibă o durată de viață medie de cel puțin 20000 h (aproximativ 3 ani) la o temperatură de 155 °C.

Tabelul 1.2. Corespondența între valorile RTE și clasele de izolație [4].

RTE [°C]	Clasa termică	Clasa de izolație
<90	70	
>90 - 105	90	Y
>105 - 120	105	A
>120 - 130	120	E
>130 - 155	130	B
>155 - 180	155	F
>180 - 200	180	H
>200 - 220	200	C
>220 - 250	220	
> 250	250	

În ultima perioada de timp, clasificarea materialelor din punct de vedere al RTE sau plasarea lor în anumite clase termice, numai pe baza comportării acestora la acțiunea temperaturii, este tot mai des pusă în discuție. Astfel, trebuie avut în vedere faptul că materialele electroizolante care fac parte din schemele de izolație ale mașinilor și echipamentelor electrice sunt supuse adesea unor solicitări electrice, mecanice, de mediu, etc. de multe ori mai importante decât solicitările termice. De aceea, s-a propus ca atât materialele electroizolante cât și sistemele de izolație mai complexe să fie caracterizate

prin *indici de performanță*, care să exprime comportarea lor la acțiunea simultană a temperaturii, solicitărilor electrice, mecanice, etc.