

ROLUL ASSET MANAGEMENT-ULUI ÎN EXPLOATAREA ȘI MENTENANȚA TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE

Ana Mădălina DUICĂ¹, Gabriel TĂNĂSESCU¹, Marius FILIȘANU¹
Petru V. NOTINGHER²

¹Simtech International SRL

²Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
mmaftei@simtech-international.ro¹, gtanasescu@simtech-international.ro¹,
mfilisanu@simtech-international.ro¹, petrunit2000@yahoo.fr²

Rezumat. În această lucrare se prezintă o analiză a aplicării conceptului de asset management în gestionarea transformatoarelor de putere aflate în exploatare. Sunt prezentate principalele elemente care stau la baza unui management eficient al acestor active, începând cu monitorizarea continuă a stării tehnice, esențială pentru identificarea timpurie a defectelor și prevenirea incidentelor majore. Un accent deosebit este pus pe determinarea indicelui de sănătate (Health Index) pentru fiecare transformator, metodă ce permite evaluarea obiectivă a stării sale reale și reducerea incertitudinilor asociate deciziilor operaționale. Pe baza acestui indice, transformatoarele pot fi ierarhizate și prioritizate în funcție de risc, criticitate și necesarul de investiții, facilitând astfel planificarea optimă a mentenanței, modernizărilor și înlocuirilor. Lucrarea prezintă, totodată, modul în care aceste elemente converg în cadrul unui concept integrat de asset management, ce urmărește maximizarea duratei de viață a transformatoarelor, reducerea costurilor de operare și creșterea fiabilității rețelei. În concluzie, adoptarea unui model modern de asset management reprezintă o condiție necesară pentru asigurarea unui echilibru eficient între performanță, risc și cost în gestionarea transformatoarelor de putere aflate în exploatare.

1. INTRODUCERE

Transformatoarele de putere sunt unele dintre cele mai semnificative și costisitoare echipamente ale sistemului de energie, servind ca factor vital în furnizarea de energie electrică unui sistem de energie. Aceste echipamente sunt expuse constant la stresuri termice, electrice, mecanice și de mediu, care în cele din urmă cauzează îmbătrânirea componentelor, precum și a sistemului de izolație. Acest fenomen, numit îmbătrânire tehnologică, are un impact evident asupra performanței funcționale, fiabilității și siguranței operaționale a transformatoarelor de putere.

Având în vedere procesul rapid de îmbătrânire a infrastructurii energetice și limitările economice din ce în ce mai severe, abordarea modernă în gestionarea acestor infrastructuri vitale trebuie aplicată într-un mod care să fie în concordanță cu condițiile actuale. Metodele convenționale care se bazează doar pe întreținerea preventivă sau corectivă sunt inadecvate în raport cu cerințele actuale de fiabilitate, siguranță și economisire a costurilor. În acest sens, paradigma de management al activelor în domeniul transformatoarelor de energie oferă o abordare practică pentru gestionarea transformatoarelor de putere pe parcursul întregii lor vieți prin combinarea monitorizării condiției tehnice cu evaluarea obiectivă a condiției (așa cum este indicele de sănătate, analiza riscurilor și luarea deciziilor bazate pe risc) pentru gestionarea vieții și asumarea riscurilor.

Rezultatul principal al acestei metode este prevenirea defecțiunilor majore, optimizarea întreținerii și maximizarea duratei de viață operaționale a transformatoarelor de putere.

2. MONITORIZAREA TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE DE PUTERE

Starea tehnică a unui transformator din cadrul sistemului electroenergetic (SEE) este definită prin ansamblul parametrilor care descriu, din punct de vedere cantitativ și calitativ, capacitatea acestuia de a funcționa conform cerințelor operaționale. Evaluarea stării tehnice permite clasificarea funcțională a componentei, de la o stare optimă de funcționare până la starea de defect ireversibil, trecând prin etape intermediare care indică gradul de uzură sau de funcționare limitată.

Această evaluare implică două activități fundamentale: monitorizarea și diagnosticarea. Monitorizarea presupune selectarea și urmărirea unor parametri relevanți, utilizarea de senzori și traductoare, achiziționarea și prelucrarea datelor în format digital și integrarea acestora în baze de date.

Diagnosticarea implică interpretarea datelor, prin modele logice și analize comparative, pentru a evalua în timp real starea și rezerva de durată de viață a componentelor transformatoarelor [1], [2].

Monitorizarea transformatoarelor de putere se poate realiza în două moduri:

- monitorizare on-line, care permite supravegherea continuă a echipamentului fără necesitatea întreruperii conexiunii la rețea, și
- off-line, care presupune deconectarea echipamentului de la sistem pentru efectuarea măsurătorilor.

Monitorizarea on-line utilizează senzori specializați care înregistrează în timp real o serie de parametri esențiali pentru evaluarea stării de funcționare a transformatorului. Printre aceștia se numără: temperaturile înfășurărilor și ale uleiului electroizolant în puncte strategice, concentrația de apă și de gaze dizolvate în ulei, prezența particulelor solide, nivelul descărcărilor parțiale, funcționarea ventilatoarelor și pompelor, nivelul uleiului din conservator, precum și starea comutatorului de reglaj sub sarcină [3].

Monitorizarea off-line implică efectuarea de teste și măsurători periodice, cu transformatorul scos din exploatare și oferă informații detaliate privind starea izolației, a înfășurărilor și a uleiului electroizolant. Metodele moderne de diagnosticare includ tehnici avansate precum spectroscopia dielectrică în domeniul timp-frecvență și analiza funcției de transfer la frecvențe înalte, care permit identificarea deformărilor mecanice și a degradărilor interne.

Integrarea monitorizării on-line și off-line într-un sistem unitar de achiziție și prelucrare a datelor constituie baza evaluării obiective a stării tehnice a transformatoarelor și reprezintă primul pas în implementarea unui sistem eficient de asset management.

3. INDICE DE SĂNĂTATE

Indicele de sănătate (IS) al unui echipament electroenergetic este o mărime convențională de analiză globală a stării sale tehnice, la un anumit moment. Indicele de sănătate se definește în funcție de factorii de diagnostic aleși, ponderea acestor factori în afectarea stării tehnice a echipamentului, calificativul acordat componentei vizate de factorul de diagnostic [4].

Cunoașterea indicelui de sănătate permite evaluarea obiectivă a stării transformatorului, determinarea tipului de mentenanță necesar, planificarea retragerii din exploatare, estimarea siguranței în funcționare și fundamentarea deciziilor de investiții. Indicele de sănătate se calculează pe baza indicilor de diagnostic și a ponderilor asociate fiecărui factor, rezultând o valoare numerică cuprinsă între 0 și 1.

Indicele de sănătate se definește și se calculează cu relația [2]:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot ID_i}{4 \cdot \sum_{i=1}^n c_i} \quad (1)$$

unde IS este un număr între 0 și 1, n este numărul total al factorilor de diagnostic, c_i reprezintă ponderea acordată stării fiecărui element (pe o scară de la 1 la 10), ID_i reprezintă indicele de diagnostic (pe o scară de la 1 la 4, 4 fiind valoarea maximă).

În lipsa unor reglementări internaționale standardizate, valorile factorilor de diagnostic și ale ponderilor asociate pot diferi în funcție de experiența evaluatorului și de specificul rețelei. Metoda adoptată de Simtech International, dezvoltată în colaborare cu Universitatea Politehnica din București, extinde metoda inițială propusă de Jahromi et al.[4] prin utilizarea unui număr extins de factori de diagnostic, oferind o evaluare mai precisă a stării de degradare a transformatoarelor de putere (Tabelul 1).

Tabelul 1

Factorii de diagnostic și factorii de pondere utilizați în calculul indicelui de sănătate IS.

Nr. crt.	Factor de diagnostic	c_i	ID_i	
1.	Gazele dizolvate în uleiul din cuvă (DGA)	10	4, 3, 2, 1	
2.	Încărcarea transformatorului	10	4, 3, 2, 1	
3.	Factorul de pierderi al sistemului de izolației al înfășurărilor	10	4, 3, 2, 1	
4.	Termografia în infraroșu	10	4, 3, 2, 1	
5.	Calitatea uleiului electroizolant	6	4, 3, 2, 1	
6.	Creșterea numărului lucrărilor de mentenanță	8	4, 3, 2, 1	
7.	Conținutul de furani	5	4, 3, 2, 1	
8.	Raportul de transformare	5	4, 3, 2, 1	
9.	Reactanța de scăpări	8	4, 3, 2, 1	
10.	Rezistențele ohmice ale înfășurărilor	6	4, 3, 2, 1	
11.	Rezistența conexiunii miez-pământ	2	4, 3, 2, 1	J
12.	Starea izolatoarelor de trecere	5	4, 3, 2, 1	A
13.	Starea cuvei	2	4, 3, 2, 1	H
14.	Starea sistemului de răcire	2	4, 3, 2, 1	R
15.	Starea conservatorului	1	4, 3, 2, 1	O
16.	Starea fundației	1	4, 3, 2, 1	M
17.	Împământarea	1	4, 3, 2, 1	I
18.	Starea garniturilor	1	4, 3, 2, 1	2
19.	Starea conexiunilor	1	4, 3, 2, 1	0
20.	Pierderi de ulei electroizolant	1	4, 3, 2, 1	0
21.	Nivelul uleiului electroizolant	1	4, 3, 2, 1	9
22.	Gaze dizolvate în uleiul comutatorului de ploturi	6	4, 3, 2, 1	
23.	Calitatea uleiului comutatorului de ploturi	3	4, 3, 2, 1	
24.	Starea generală de degradare a comutatorului de ploturi	5	4, 3, 2, 1	
25.	Factorul de conductivitate al uleiului k_c	10	4, 3, 2, 1	Bogdan
26.	Indicele de polarizare al uleiului k_p	10	4, 3, 2, 1	Gorgan &
27.	Factorul de pierderi al uleiului $tg \delta$ la frecvența de 1mHz	10	4, 3, 2, 1	UPB & Simtech
28.	Conductivitatea electrică a uleiului σ_o	10	4, 3, 2, 1	International
29.	Descărcările parțiale	6	4, 3, 2, 1	2012
30.	Rezistența de izolație a înfășurărilor	10	4, 3, 2, 1	Simtech
31.	Calitatea hârtiei celulozice	10	4, 3, 2, 1	International

Deoarece $1 \leq ID_i \leq 4$, valoarea numerică a lui IS este un număr subunitar cuprins între 0,25 și 1. Valoarea 1 corespunde stării tehnice foarte bune a echipamentului, în timp ce valoarea 0,25 corespunde la un echipament cu stare tehnică nesatisfăcătoare.

Evaluarea calitativă a stărilor tehnice ale transformatoarelor de putere se poate face în categorii de stare, ca de exemplu: „foarte bună”, „satisfăcătoare”, „foarte slabă” și „periculoasă”, termenii putând avea semnificații diferite și implicând măsuri corective diferite. O propunere de corelare a valorilor indicilor de sănătate cu aceste calificative, în general acceptată de mulți operatori de transformatoare este dată în Tabelul 2 [5].

Tabelul 2

Evaluarea stării tehnice a transformatoarelor de putere pe baza IS [5].

IS	Starea tehnică	Recomandări
$0.85 < IS \leq 1.0$	Foarte bună	Mentenanța normală
$0.7 < IS \leq 0.85$	Bună	Mentenanța normală
$0.5 < IS \leq 0.7$	Satisfacatoare	Mărirea numărului de teste de diagnosticare
$0.3 < IS \leq 0.5$	Foarte slabă	Planificare înlocuirii sau reparării echipamentului
$IS < 0.3$	Periculoasă	Evaluare imediată a riscului. Înlocuirea sau repararea echipamentului

4. INDICELE DE RISC

Riscul este definit în standardul IEC 31010:2019 ca o combinație a frecvenței sau a probabilității de apariție și consecința unui eveniment periculos specificat [6]. În cazul transformatoarelor de putere, riscul depinde atât de starea tehnică a echipamentului, cât și de importanța sa în cadrul rețelei electrice.

Toate echipamentele aflate în funcțiune sunt însoțite de un set de factori de risc. În practică, problema constă în stabilirea unui nivel global de risc, sumând factorii de risc identificați pentru a determina poziția echipamentului în organizație, atât din punct de vedere al performanței operaționale, cât și al potențialei sale capacități de a realiza aceste performanțe. Factorii de risc sunt clasificați în funcție de impactul lor asupra echipamentului analizat, luând în considerare contextul analizei de risc și categoriile de performanță evaluate. Fiecare factor de risc are asociat un nivel de risc și un nivel ierarhic al consecințelor, numit rangul factorului de risc.

Impactul este determinat pe baza locației transformatorului în rețea, a rolului său funcțional și a consecințelor asupra continuității alimentării. Incidente similare în Sistemul Energetic Național (SEN) pot avea efecte foarte diferite în funcție de locația, rolul și caracteristicile acelui echipament. Rezultatul va fi exprimat pe o scară de la 1 la 5, unde 1 înseamnă cel mai mic risc și 5 înseamnă cel mai mare risc. Rezultatul evaluării este exprimat pe o scară discretă, de la nivel de risc scăzut la nivel de risc critic. Metoda distinge transformatoarele cu condiții tehnice similare, dar cu semnificații foarte diferite în sistem, așa cum este indicat în Tabelul 3.

Tabelul 3

Scara impactului nivelului de risc

RIL 5	Impact/ Nivel cel mai critic
RIL 4	Impact/ Nivel Critic
RIL 3	Impact/ Nivel Ridicat
RIL 2	Impact/ Nivel Mediu
RIL 1	Impact/ Nivel scazut

5. ASSET MANAGEMENT

Pe lângă integrarea monitorizării și a indicilor de stare și risc, conceptul de asset management aplicat transformatoarelor de putere implica și alinierea deciziilor tehnice cu obiectivele strategice ale operatorului de rețea. Astfel, gestionarea activelor nu mai se limitează la nivelul fiecărui echipament individual, ci vizează optimizarea performanței întregii flote de transformatoare (Fig. 1).

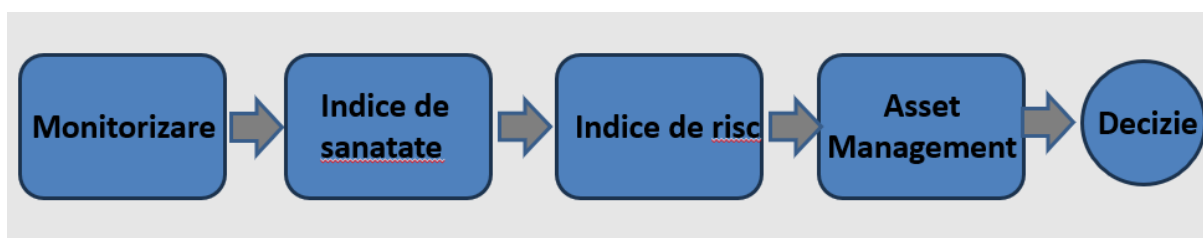


Fig. 1 – Asset Management.

Elementul esențial al acestui concept este reprezentat de gestionarea activelor pe baza ciclului de viață, în care deciziile precum mentenanța, modernizarea sau înlocuirea sunt fundamentate pe durata de viață (Life Cycle Cost – LCC) și pe riscurile asociate. În acest mod, asset management-ul permite identificarea momentului optim pentru intervenție, evitând atât exploatarea excesivă a echipamentelor degradate, cât și înlocuirea prematură a unor transformatoare aflate încă într-o stare tehnică satisfăcătoare.[7]

În acest sens, managementul activelor ne va permite să determinăm când ar fi momentul optim pentru intervenție, pentru a evita supraexploatarea echipamentelor degradate și înlocuirea prematură a transformatoarelor care sunt încă într-o stare tehnică satisfăcătoare. Mai mult, ceea ce susține managementul activelor este o digitalizare completă a trasabilității tehnice a sistemului, unde fiecare transformator este conectat la o aplicație software care permite înregistrarea datelor constructive, istoric de operare, rezultate ale testelor offline, date de monitorizare online, date ale indicelui de sănătate, date ale indicelui de risc și altele asemenea. O astfel de strategie asigură trasabilitatea deciziilor privind monitorizarea performanței, crește transparența operațiunilor și facilitează analiza comparativă a echipamentelor. Un model integrat permite ca managementul activelor să devină un sprijin pentru luarea deciziilor, trecând de la o abordare reactivă la una predictivă prin identificarea defectelor și utilizarea eficientă a resurselor tehnice și financiare.[8]

5.1. Prioritizarea activelor

Prioritizarea activelor se realizează pe baza unei matrice de risc, care corelează indicele de sănătate cu impactul asupra sistemului (Fig. 2). Această metodă permite stabilirea ordinii de intervenție, identificarea echipamentelor care necesită reparații urgente, a celor care pot fi monitorizate în continuare și a celor care trebuie înlocuite.

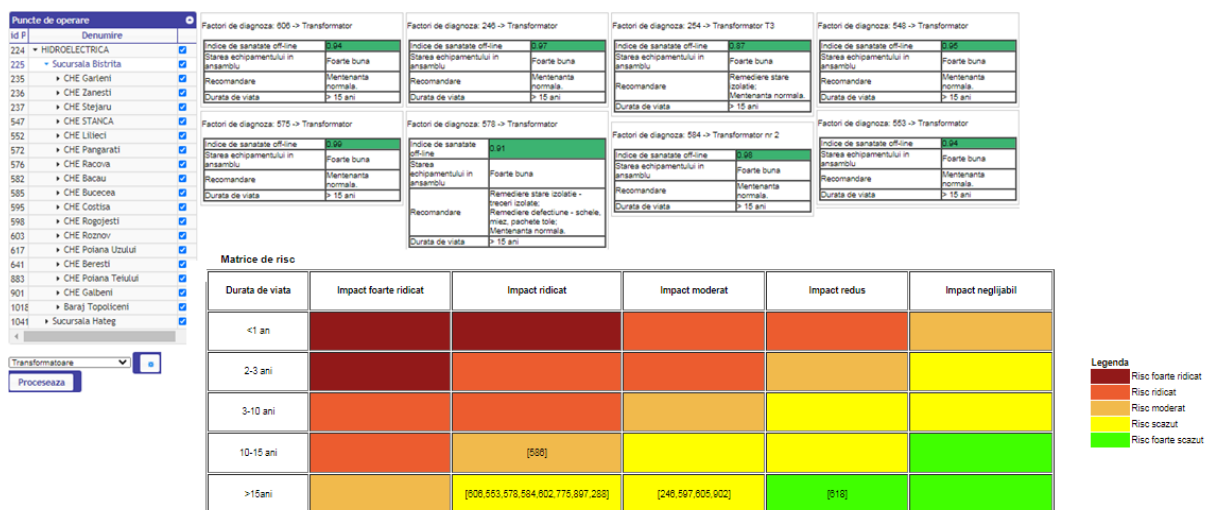


Fig. 2 – Matricea de risc.

Un avantaj important al acestei abordări constă în optimizarea alocării resurselor financiare, în special în condiții de bugete limitate. Astfel, investițiile sunt direcționate cu prioritate către echipamentele care prezintă cel mai mare risc global, maximizând eficiența utilizării fondurilor disponibile.

În plus, prioritizarea bazată pe risc contribuie la creșterea siguranței în exploatare și a fiabilității sistemului electroenergetic, deoarece permite reducerea probabilității apariției avariilor majore în nodurile critice ale rețelei. Această metodologie susține tranziția către un model de mentenanță condițională și predictivă, în care intervențiile sunt declanșate de starea reală a echipamentului și nu de intervale de timp prestabilite.

5.2. Rolul asset management-ului în mentenanța transformatoarelor de putere

Mentenanța transformatoarelor de putere este vitală pentru asigurarea unei funcționări sigure și fiabile a sistemului electroenergetic. Metodele tradiționale, bazate pe intervale fixe de timp sau intervenții corective, au limitări, mai ales pe măsură ce infrastructura îmbătrânește și rețelele devin mai complexe. Implementarea asset management schimbă radical abordarea, trecând de la mentenanța reactivă sau preventivă strictă la cea condițională și predictivă, fundamentată pe starea reală a echipamentelor. Aceasta se realizează prin monitorizare continuă, evaluarea stării tehnice cu indicii de sănătate și analiza riscurilor. Monitorizarea online și offline oferă date despre evoluția parametrilor critici, facilitând identificarea timpurie a defectelor incipiente. Aceste informații contribuie la calculul indicelui de sănătate, care sintetizează starea tehnică globală a echipamentului. În funcție de valoarea acestui indice, se stabilesc cel mai benefic moment și tipul intervențiilor de mentenanță, evitând intervențiile inutile și utilizarea excesivă a echipamentelor degradate.

În cadrul asset management-ului, deciziile privind mentenanța nu sunt luate izolat, ci sunt corelate cu indicii de risc, care integrează atât probabilitatea de defectare, cât și consecințele acesteia asupra sistemului electroenergetic. Astfel, transformatoarele cu o stare tehnică similară pot beneficia de strategii diferite de mentenanță, în funcție de impactul lor în rețea. Această metoda facilitează prioritizarea eficientă a lucrărilor de mentenanță și alocarea optimă a resurselor tehnice și financiare.

Asset management-ul contribuie, de asemenea, la optimizarea planificării mentenanței, prin utilizarea istoricului de exploatare și a tendințelor de degradare pentru estimarea duratei de viață rămase. Planurile de mentenanță devin astfel flexibile și adaptabile, fiind actualizate

periodic în funcție de evoluția stării echipamentelor. Astfel, se reduce numărul intervențiilor neașteptate și se reduce riscul unor avarii majore. Un alt beneficiu important al integrării asset management-ului în procesul de mentenanță este sprijinul în luarea deciziilor economice. Legătura dintre costurile de mentenanță, starea tehnică și riscul asociat permite evaluarea eficienței intervențiilor și identificarea situațiilor în care reparațiile nu mai sunt rentabile din punct de vedere tehnico-economic, fiind necesară modernizarea sau înlocuirea echipamentului.

6. CONCLUZII

Implementarea managementului activelor pentru transformatoarele de putere îmbunătățește fiabilitatea rețelei, reduce avariile majore, scade costurile de întreținere și optimizează investițiile. Deciziile se bazează pe date precise și evaluări obiective, nu pe estimări sau criterii subiective. Prioritizarea pe bază de risc și digitalizarea proceselor de monitorizare și analiză reprezintă direcția viitorului în gestionarea modernă a infrastructurii energetice.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. P.V. Notingher, C.Stancu, L.V.Badicu, B. Gorgan, S.A.Busoi, G.Tanasescu *Concerning the Power Transformers Insulation Systems Monitoring*, Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies, **11**, pp.101-120, 2017.
2. G. Tanasescu, B. Gorgan, S.Busoi, A.Badita, P.V. Notingher *Monitoring and diagnosis of electrical equipment using a web software. Health index and remaining lifetime estimation*, Proceedings of the International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika '16), Pilsen , September 6–8, pp.1-4, 2016,
3. ***Sistem de monitorizare - diagnosticare a transformatoarelor de putere, Simtech International Ltd. Anul?
4. A.N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J.R.R. Service, *An Approach to power transformer asset management using health index*, IEEE Electrical Insulation Magazine, **25**, 2, pp. 20-34, 2009.
5. G. Tanasescu, P.V. Notingher, R. Parlog-Cristian, B. Gorgan , *Utilizarea indicelui de sanatate pentru determinarea matricii de risc a echipamentelor din SEN*, Lucrarile Simpozionului ACTUALITĂȚI ȘI PERSPECTIVE ÎN DOMENIUL MAȘINILOR ELECTRICE (SME'18), Editia a XIV-a, Paper 23, pp. 1-12, Bucuresti, 9 noiembrie, 2018,.
6. ***IEC 31010:2019, Risk management - Risk assessment techniques, Geneva, Edition 2-0, 2019-06.
7. ***ISO 55000:2014, Asset Management – Overview, principles and terminology, International Organization for Standardization, Geneva, 2014.
8. ***ISO 55001:2014, Asset Management – Management systems – Requirements, International Organization for Standardization, Geneva, 2014.