

Tehnologii complementare

Analiza de curent la motoarele cu inducție (2)

Traducere și adaptare
ing. Carmen Popescu

Studiile au arătat că până la 20% din motoarele cu inducție folosite în aplicațiile industriale prezintă defecte de rotor, bare rotorice fisurate sau rupte, sau excentricități rotorice. În mod normal, un motor cu inducție poate induce în înfășurări un curent de cinci-șase ori mai mare decât curentul absorbit, ceea ce poate crea o serie de probleme la pornire. În prezent, există tehnici eficiente de diagnosticare a defectelor mașinilor electrice critice, în vederea prevenirii avarierii acestora și întreruperii producției.

1 Scurtă teorie

Analiza de curent este o tehnică utilizată pentru determinarea stării de funcționare a motoarelor cu inducție, fără a fi necesară întreruperea producției. Această tehnică se folosește concomitent cu analiza de vibrații și analiza termică, pentru a confirma diagnosticul utilajelor cheie. Analiza de curent se bazează pe faptul că motorul cu inducție poate fi privit, în esență, ca un traductor. Prin montarea unui senzor de curent cu efect Hall fie în circuitul primar, fie în cel secundar, se pot observa fluctuațiile de curent ale motorului. Astfel, deoarece motoarele pot fi testate de la distanță, din panoul de comandă, se elimină din start riscurile efectuării măsurătorilor în zonele periculoase sau inaccesibile ale instalațiilor tehnologice.

Pentru conversia semnalelor din domeniul timp în domeniul frecvență, este absolut necesar un analizor FFT de înaltă rezoluție. Un semnal de curent provenit de la un motor electric, este o sinusoidă perfectă la 50 Hz. În timpul funcționării, în semnalul măsurat se vor regăsi mai multe armonici, deci semnalul real va cuprinde mai multe vârfuri, inclusiv pe cele apărute la frecvența liniei și la armonici ale acesteia. Acesta este spectrul specific al motorului. Analizarea acestor armonici după amplificarea și prelucrarea semnalului vă va permite identificarea diferitelor defecte de motor. Cercetările au arătat că, atunci când există o rezistență ridicată (de exemplu ca urmare a ruperii barelor rotorice) apar armonicile fluxurilor de curent din întrefier. Aceste fluxuri induc componente de curent în înfășurarea statorică, care determină modularea curentului de intrare la \pm nr. de poli înmulțit cu alunecarea. Cunoașterea acestei relații permite determinarea prezenței și evaluarea gradului de severitate al defectului. Tehnica analizei de curent se poate folosi, de asemenea, și pentru detectarea întrefierului excentric și a spirelor în scurtcircuit.

2 Detectarea barelor rupte

2.1 Introducere

Câmpul magnetic rotitor creează o tensiune în barele rotorice. În spectrul de curent, frecvența proprie polilor ($F_p = \text{alunecarea} \times \text{nr. de perechi de poli ai înfășurării statorice}$) va apărea sub formă de benzi laterale de frecvență la:

$$f_p = (1 \pm 2s) \times F_L$$

unde s reprezintă factorul de alunecare și este adimensional (Anexa I), iar F_L frecvența liniei.

La închiderea circuitului (barele în scurt circuit), curentul generat este proporțional cu turația la care câmpul traversează conductorul. Acesta interacționează cu câmpul statorului pentru a genera o forță în barele rotorice. De asemenea, se dezvoltă în cealaltă parte a rotorului o forță egală cu aceasta, dar de sens opus. Aceste două forțe dau naștere unui moment care antrenează sarcina.

Deci, când există bare rotorice rupte, apar benzi laterale la dublul frecvenței de alunecare. Prin urmare, vorbim despre o variație ciclică de curent datorată momentului care antrenează sarcina la dublul frecvenței de alunecare ($2sf_L$) și vibrației corespunzătoare turației de lucru care, de asemenea, este funcție de inerția de antrenare a motorului.

Dacă se întrerupe curentul creat sau câmpul magnetic la unul dintre capetele rotorului, cele două forțe devin inegale, rezultanta acestora fiind o forță radială, care reprezintă sursa vibrațiilor. Barele rotorice rupte sau fisurate determină acest dezechilibru de forțe. Forțele antrenează rotorul cu o sarcină constantă, plus o sarcină care variază cu $2 \times$ alunecarea. De aceea, forța care acționează pe

lagăre va avea componente de frecvență la $1 \times \text{RPM}$ și $1 \times \text{RPM} \pm 2 \times$ alunecarea. Astfel barele rotorice sparte sau fisurate, conexiunile improprii între barele rotorice și inelele colectoare scurtcircuitate sau spirele în scurtcircuit vor produce vibrații mari la $1 \times \text{RPM}$, cu benzi laterale F_p (frecvența polilor). În plus, barele rotorice fisurate vor genera adesea benzi laterale în jurul armonicilor 3, 4 și 5 ale turației de lucru. Barele rotorice cu jocuri dau benzi laterale la $2 \times$ frecvența liniei ($2F_L$), încadrând frecvențele proprii barelor rotorice (RBPF) și/sau armonicile acestora ($RBPF = \text{numărul de bare rotorice} \times \text{RPM}$). Adesea pot apărea nivele mai mari de vibrație la $2 \times \text{RBPF}$, cu amplitudine mică numai la $1 \times \text{RBPF}$. În mod normal, această terminologie poate la un moment dat să creeze confuzii, ea nefiind universal recunoscută de către practicieni. În orice caz, universal recunoscut în lucrările elaborate de producătorii și proiectanții de mașini electrice este întotdeauna faptul că barele rotorice se reflectă în spectru sub formă de benzi laterale la dublul frecvenței de alunecare.

Tabel 1 – Frecvențe de defect la funcționarea sub diferite sarcini

Sarcina	Alunecare	Turație (RPM)	Benzi laterale	
			Frecvență inferioară benzi laterale (Hz)	Frecvență superioară benzi laterale (Hz)
Sarcină 0%	0.01	1485	49	51
Sarcină 50%	0.04	1440	46	54
Sarcină 100%	0.08	1380	42	58

Diferența de aproximativ 48 dB ar putea indica prezența unei conexiuni de înaltă rezistență, în timp ce o diferență de aproximativ 35 dB ar putea indica mai multe bare rotorice rupte.

Realitatea este undeva la mijloc, iar nivelul exact de degradare se poate evalua numai la în fiecare caz în parte (tabelul 2).

Tabel 2 – Evaluarea severității defectelor barelor rotorice

GHID PENTRU EVALUAREA SEVERITĂȚII DEFECTELOR BARELOR ROTORICE			
Nivel de severitate	F_L/F_p (dB)	Evaluare stare rotor	Acțiuni corective recomandate
1	>60	Excelentă	Nu sunt necesare
2	54-60	Bună	Nu sunt necesare
3	48-54	Moderată	Se urmărește periodic evoluția
4	42-48	Este posibil să existe o fisură în stare de evoluție sau alte probleme care conduc la creșterea rezistenței	Se impune urmărirea evoluției cu periodicitate crescută
5	36-42	Cel mai probabil una sau două bare rotorice sunt fisurate sau sparte	Se efectuează măsurători de vibrații pentru confirmarea sursei de defect și a severității acestuia.
6	30-36	Există mai multe bare rotorice fisurate sau rupte	Se impun reparații
7	<30	Există mai multe bare rotorice fisurate sau rupte și inele colectoare deteriorate	Se impun reparații sau înlocuire.

La efectuarea analizei de curent este indicat să aveți motoarele încărcate cel puțin 70%. În acest context, cea mai corectă metodă de lucru este de a întârzia efectuarea analizei, până când motorul este suficient de încărcat pentru ca rezultatele să fie elocvente. Pentru ca procedura să aibă eficiență maximă, înainte de începerea analizei propriu-zise, se recomandă citirea amperajului. Multe dintre mașinile supuse monitorizării fac parte din instalații industriale și fluxuri tehnologice care presupun condiții de lucru variabile și pentru ca analiza efectuată să fie concludentă, trebuie să alegem momentul cel mai potrivit în funcționarea utilajului, când putem colecta datele. Rămâne totuși în dezbateră problema utilajelor care, în mod constant, nu funcționează la încărcate suficient de mare pentru a permite efectuarea unei analize de curent concludente. În această situație, trebuie să luați în calcul două întrebări cheie:

- Mai are rost efectuarea analizei de curent la aceste aplicații?
- Ce alte acțiuni ar trebui luate în considerare, având la bază aceste date?

La prima întrebare, răspunsul este da, cu o condiție. Se pot testa totuși performanțele motoarelor și se poate efectua urmărirea eficientă a istoricului acestora, chiar și în cazul în care utilajul are parametri de lucru variabili, cu condiția ca sarcina să fie suficient de mare. Cât timp sarcina este îndeajuns de mare, se poate evalua corect starea motorului, dacă dispunem de suficient de multe date care să contureze evoluția utilajului în timp.

Cea mai importantă întrebare rămâne totuși ce-i de făcut dacă motorul este încărcat sub 70%. Răspunsul la această întrebare este pur și simplu o aplicație în sine. Ne punem legitim întrebarea dacă s-a modificat cumva procesul tehnologic și a scăzut puterea necesară pentru această mașină? A fost motorul în cauză folosit întotdeauna sub sarcină? Acesta este un caz în care cea mai bună măsură constă în reproiectarea utilajului. Dacă folosim motoarele la 50%÷60% din capacitate, atunci cu siguranță putem face economii importante prin instalarea altora cu caracteristici adecvate aplicației respective.

2.2 Strategia de diagnosticare

Obiectivul principal constă în efectuarea unei analize FFT de înaltă rezoluție a semnalului de intrare, respectiv curentului de alimentare a motorului, în vederea identificării benzilor laterale de la $2 \times$ alunecarea. Astfel, trebuie apreciat corect dacă motorul măsurat poate opera în condiții diferite de sarcină, deoarece alunecarea (s) este o variabilă, iar frecvența de alimentare (f_L) nu are neapărat exact valoarea înscrisă pe plăcuța de timbru a motorului. Mărimea benzilor laterale (în Hz) depinde de variațiile acestor doi parametri (vezi tabelul 1).

Analiza de curent trebuie să indice cu exactitate frecvența benzilor laterale, pentru o anumită stare de funcționare a motorului. Diagnosticul obținut în urma analizei de curent trebuie să cuprindă acest aspect pentru o gamă largă de modele de motoare, precum și o estimare corectă a severității asimetriei poziției rotorului față de stator. Astfel, la momentul efectuării analizei trebuie să ia în considerare încărcarea motorului, deoarece la un număr dat de bare rotorice rupte, mărimea benzilor laterale (în dB) este o funcție de sarcină. De asemenea, trebuie să luați în considerare și soluția constructivă a rotorului. Pentru identificarea barelor rotorice rupte, se recomandă să aveți în vedere următoarele aspecte:

- Severitatea defectului și geometria rotorului;
- Importanța strategică a motorului electric respectiv;
- Ciclul de funcționare al motorului;
- Potențialul apariției de daune secundare la expunerea înfășurării la supracurenți, precum și probleme de siguranță.

Pentru asemenea cerințe, operatorul are clar nevoie de un instrument puternic și fiabil de diagnoză, de o interpretare expertă a datelor măsurate, de expertiză în proiectarea și funcționarea motoarelor cu inducție, un instrument care să ajute la elaborarea corectă a deciziilor referitoare la intervenții și reparații, ca urmare a diagnosticării defectelor și viciilor de funcționare a utilajelor. Acest lucru implică o combinație de instrumente tehnologice avansate, precum și expertiză umană.

O estimare a numărului de bare rotorice rupte (factor de bare rupte) se poate obține cu ajutorul ecuației Thomson - Rankin:

$$n = \frac{2R}{\left(10^{\frac{N}{20}} + p\right)} = \frac{2 \times 60}{\left(10^{\frac{43,5}{20}} + 2\right)} = 0,79$$

unde:

n = numărul estimat de bare rotorice rupte

R = numărul de creștături rotorice

N = media diferenței [în dB] dintre maximul și minimul benzilor laterale și componentei de la frecvența de alimentare.

p = perechi de poli ale înfășurării statorice.

2.3 Exemplu

Pentru ilustrarea celor de mai sus, s-au efectuat măsurători elocvente cu ajutorul aparatului **Viber X5™** produs de firma *VMI International AB Suedia*.

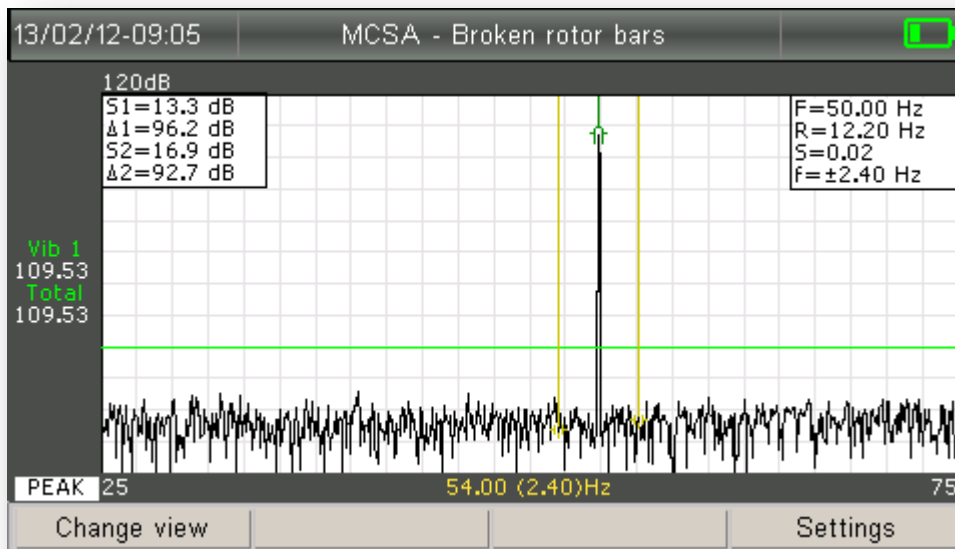


Fig.1 – Motor în bună stare, care funcționează la încărcare maximă

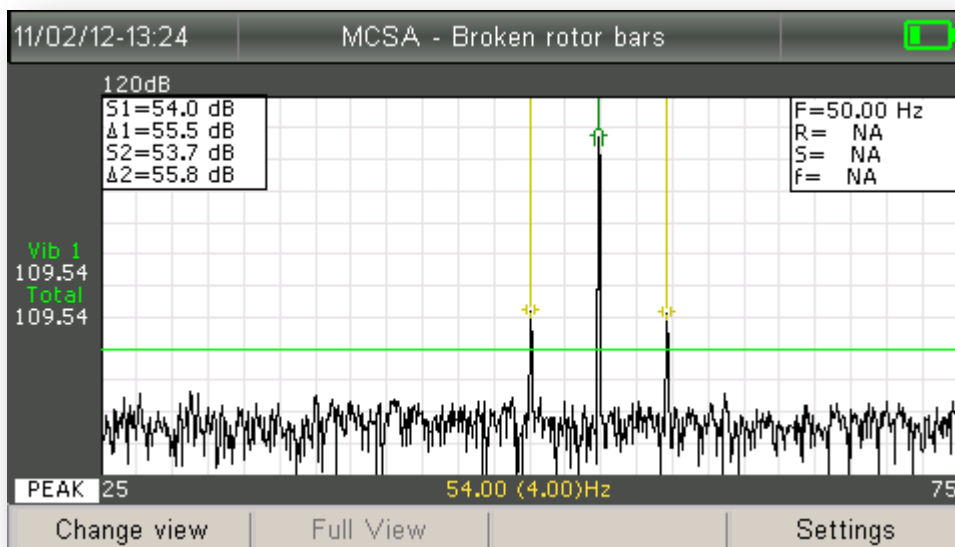


Fig.2 – Motor defect, care funcționează la încărcare maximă

2.4 Spectrul de curent demodulat

După cum spuneam într-o notă anterioară, spectrul de curent demodulat reprezintă unul dintre cele mai incitante progrese din cadrul tehnicilor și tehnologiilor de întreținere predictivă. Pentru a înțelege mai bine demodularea, ne vom aminti pe scurt conceptul de modulare a semnalului. Vorbim despre modulare este atunci când semnalul de joasă frecvență „escaladează” și fuzionează cu semnalul de înaltă frecvență, dând naștere unui semnal compus, nou. Astfel, în spectrul FFT, la frecvența purtătoare apare vârful dominant și cele mai multe dintre informațiile din spectru se pierd datorită zgomotului de fond. Deși se regăsesc mereu în spectrul de curent, frecvențele variațiilor repetitive de sarcină au fost mereu dificil de identificat și de prevăzut ca și tendință de evoluție.

Demodularea este pur și simplu procesul de îndepărtare a frecvenței purtătoare de spectru. În acest caz, frecvența purtătoare este frecvența fundamentală a liniei electrice utilizate, care este de 50 Hz în cele mai multe state, printre care și România. După îndepărtarea frecvenței purtătoare, în spectrul demodulat rămân numai frecvențele datorate variațiilor repetitive de sarcină. În spectrul demodulat de curent se pot identifica frecvențele de defect și se poate stabili tendința de evoluție a vârfurilor apărute la aceste frecvențe. În definitiv, motorul se va comporta ca un traductor permanent instalat. Totuși specialiștii consideră că trendul rămâne metoda cea mai exactă de identificare a problemelor mașinilor. Compararea spectrului determinat cu un spectru de referință, măsurat când utilajul este în perfectă stare de funcționare și lucrează la parametri optimi, precum și compararea spectrelor mașinilor identice, care funcționează în aceleași condiții, reprezintă metode de evaluare foarte eficiente. În timp, de vreme ce se înregistrează datele statistice și istorice, veți avea mai multe indicații privind stabilirea nivelului de alarmă pentru diferite tipuri de echipamente.

De obicei, vârfurile apărute la frecvențe joase se pierd în zgomotul de fond, în spectrul primar. De aceea demodularea semnalului devine atât de importantă.

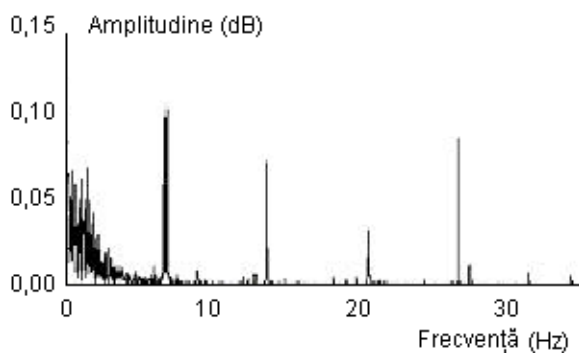


Fig.3 – Spectrul demodulat

Fig. 3 prezintă spectrul demodulat provenit din spectrul primar prezentat în Fig.2. Observați cât de mult se simplifică și cât de ușor se poate analiza spectrul demodulat, față de cel inițial. Eliminând din spectru frecvența liniei (50 Hz), frecvențele caracteristice defectelor mecanice devin evidente. Frecvențele benzilor laterale prezentate în Fig.2, apar în spectrul demodulat la din Fig.3 la 8,0 Hz. Privind îndeaproape spectrul inițial, observăm existența vârfurilor la 2x și 3x, care în mod normal sunt greu de identificat.

3 Determinarea întrefierului excentric

3.1 Introducere

Putem vorbi despre întrefier excentric sau întrefier cu grosime variabilă în două situații, care există simultan în funcționarea motoarelor reale și se datorează toleranțelor de fabricație și/ sau procedurilor de instalare (în special motoarele mari). În primul rând, există o excentricitate statică, determinată de aspectul ușor ovalizat al statorului sau de poziționarea incorectă a rotorului sau statorului. Există întotdeauna un nivel inerent de excentricitate statică, datorată însumării tuturor toleranțelor de fabricație ale părților componente ale motorului. În al doilea rând vorbim despre o excentricitate dinamică, adică există în permanență un întrefier minim de jur împrejurul rotorului față de stator, care depinde de spațiu și de timp. Dimensiunile acestuia se pot datora geometriei imperfecte a rotorului, dilatării termice a acestuia sau uzării lagărelor motorului. Excentricitatea întrefierului specificată de către producător reprezintă excentricitatea radială totală (statică plus dinamică) și în mod normal este dată ca procent ($e\%$) din excentricitatea nominală radială (g).

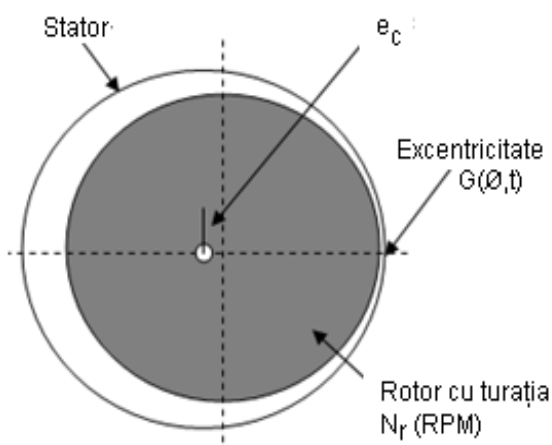


Fig. 4 - Întrefier excentric

Terminologia de definire a întrefierului excentric este următoarea:

g = excentricitate nominală întrefier, prevăzută în specificația producătorului [mm]

$G(\varnothing, t)$ = grosimea întrefierului de-a lungul periferiei [mm]

e_c = excentricitate absolută întrefier, [mm]

$e\%$ = excentricitate globală întrefier în %, $e = e_c/g$

ω = turația rotorului, [rad/sec]

\varnothing = poziția unghiulară a armăturii mobile față de poziția de aliniere cu armătura fixă [°]

$$G(\varnothing, t) = g \times (1 - e_s \cos \varnothing - e_s \cos(\omega t - \varnothing))$$

3.2 Cauze și efecte ale întrefierului excentric la motoarele cu inducție

Excentricitatea statică determină apariția unei forțe electromagnetice liniare de dezechilibru (FED), care încearcă să împingă de direcția excentricității sau interstițiului minim: Excentricitatea dinamică produce o forță electromagnetă de rotație care acționează asupra rotorului cu viteza acestuia de rotație.

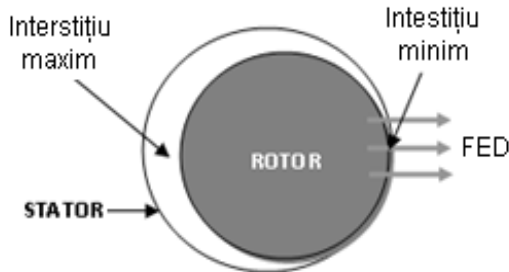


Fig 5. Dezechilibru magnetic

Dacă excentricitatea întrefierului nu se menține în limitele specificate (de obicei, un maxim de 10%), atunci ambele tipuri de excentricități pot provoca solicitarea excesivă a motorului și vor determina creșterea uzurii în lagărele acestuia. De asemenea, componenta radială a forței electromagnetice acționează asupra ansamblului statoric și cuștii rotorice, supunând astfel înfășurările statorice și rotorice unor vibrații inutile, potențial dăunătoare.

O forță electromagnetă mare datorată unei excentricități severe poate duce, în final, la ruperea întrefierului, deci la frecarea rotorului de stator, ceea ce poate determina deteriorarea izolației înfășurării statorice, ruperea barelor cuștii rotorice sau a inelelor colectoare, și, în final la reparații foarte costisitoare pentru orice motor cu inducție. Nivelul de zgomot va crește substanțial, datorită excentricității prea mari.

3.3 Diagnosticarea întrefierului excentric

Strategia de monitorizare bazată pe analiza de curent își propune să identifice caracteristicile spectrului tipic de curent, care devin indicatori în determinarea nivelurilor anormale de excentricitate rotor - stator și în aprecierea tendinței de evoluție ulterioare a defectului stabilit. Spectrul tipic de curent este cuantificat de ecuația Cameron și Sobczyk & Weinreb:

$$f_{ec} = f_L \left\{ (R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{\omega s} \right\}$$

unde:

f_{ec} = frecvența componentelor care depind de întrefierul excentric (Hz)

f_L - frecvența de alimentare (Hz)

R - număr de creștături rotorice

$n_d = \pm 1$

$n_{\omega s} = 1, 3, 5, 7$

s = factor de alunecare adimensional (Anexa I)

p = perechi de poli ai înfășurării statorice.

Dacă $n_d = 0$ în ecuația de mai sus, obținem componentele de la frecvența proprie creștăturilor rotorice, adică o serie de componente distanțate între ele la dublul frecvenței de alimentare ($2 \times f_L$).

Dacă $n_d = \pm 1$, obținem componentele suplimentare de frecvență, despre care s-a considerat inițial că sunt dependente numai de excentricitatea dinamică (Cameron). Cu toate acestea, testele experimentale suplimentare au demonstrat ulterior că odată cu creșterea excentricității statice, au

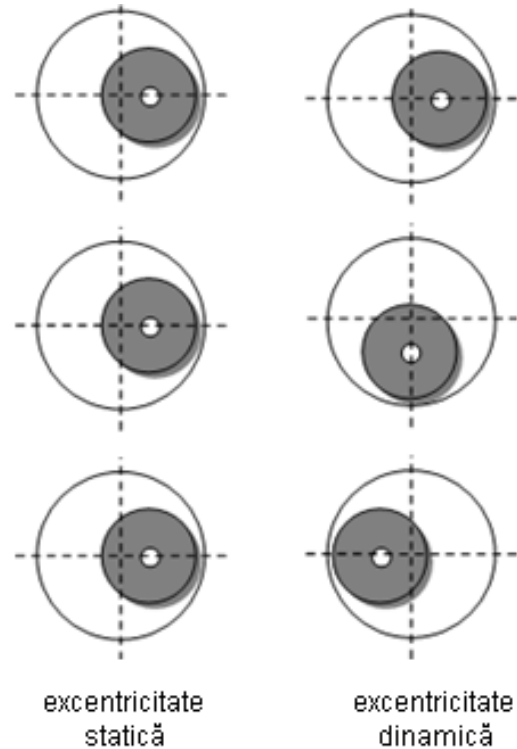


Fig.6 - Diferența dintre excentricitatea statică și cea dinamică

crescut și amplitudinile acestor componente de frecvență, care teoretic ar fi trebuit să depindă numai de excentricitatea dinamică (Thomas și Barbour).

Spectrul tipic de curent din care reies frecvențele proprii creștăturilor rotorice, precum și cele două componente rezultate din ecuația anterioară, în cazul $n_d = \pm 1$ (de fapt la $\pm F_r$ frecvența de rotație în jurul componentelor frecvențelor proprii creștăturilor rotorice) pot fi folosite pentru identificarea nivelului anormal de excentricitate.

3.4 Exemplu

Tabel 3 – Frecvențe de defect posibile în diferite condiții de funcționare

Sarcină	Turație (RPM)	Alunecare	n_{ws}		
			$n_d = -1$	$n_d = 0$	$n_d = 1$
Sarcina 0%	1485	0,01	916 Hz	941 Hz	965 Hz
Sarcină 100%	1380	0,08	855 Hz	878 Hz	901 Hz

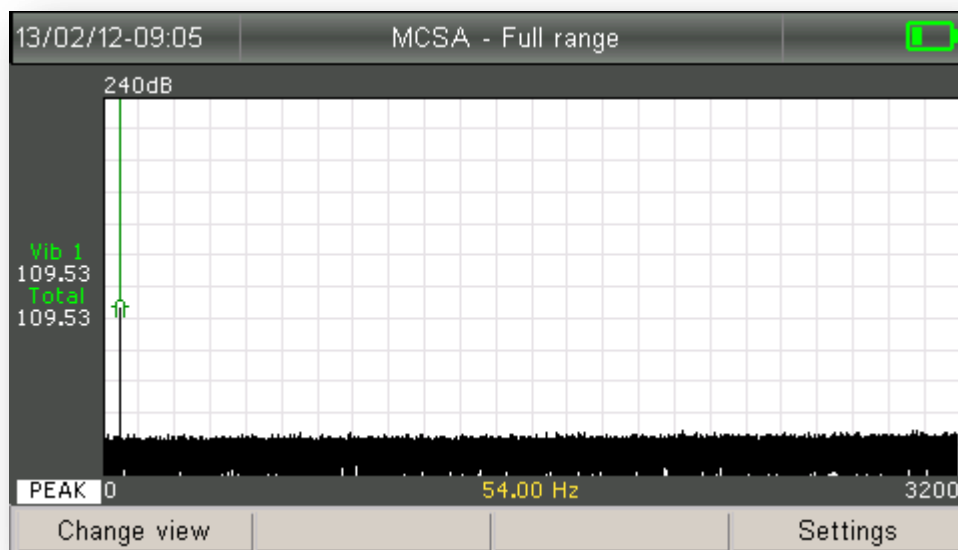


Fig. 7 - Motor în bună stare, care funcționează la încărcare maximă

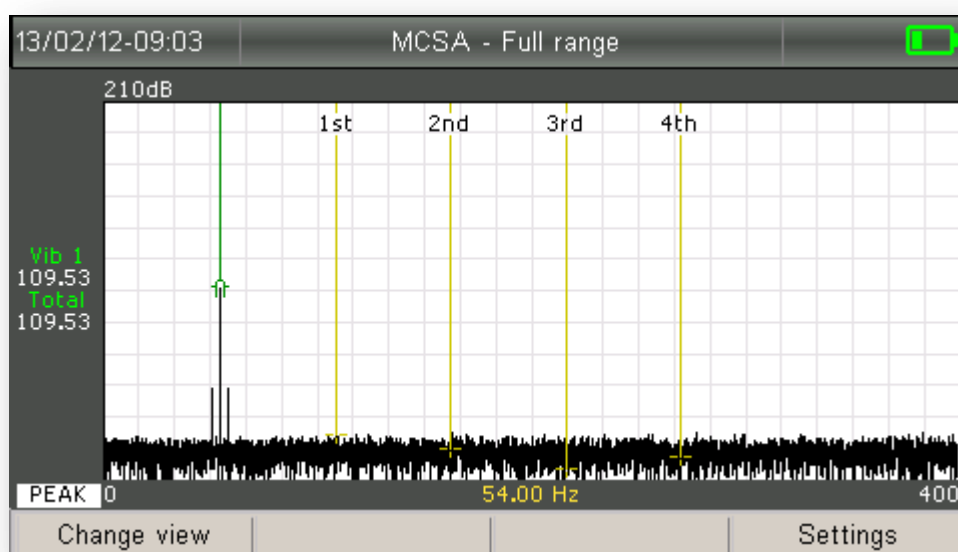


Fig.8 – Motor defect cu excentricitate 50% la încărcare maximă

4 Detectarea spirelor în scurtcircuit la înfășurarea statorică

4.1 Introducere

Este general acceptat faptul că la o anumită frecvență, la tensiuni joase, nu există în mod obișnuit un indiciu de avertizare asupra deteriorării izolației înfășurărilor la motoarele cu inducție. De obicei, degradarea izolației înfășurării statorice la curenți de joasă tensiune, nu se poate diagnostica prin măsurători la distanță.

Ideea că rotorul prezintă un defect în stadiu de dezvoltare, ne conduce inevitabil la gândul că acesta va trebui reparat. Prin urmare, dacă avem de-a face cu un motor cu inducție, de joasă tensiune, cea mai uzuală abordare este aceea de a-i permite să funcționeze până la cădere. Cu toate acestea, în procesele moderne de producție cu tehnologii contra-cronometru, căderea neașteptată a unui asemenea motor poate crea mari neajunsuri. În anumite situații, când producția este prima prioritate, poate fi nevoie de înlocuirea imediată a motorului defect cu unul nou și de repararea celui avariat, dar înlocuirea unui motor cu inducție de joasă tensiune poate fi, la un moment dat, foarte costisitoare. Cele mai des întâlnite defectele de stator se pot împărți în cinci grupe, și anume: defecte ale înfășurării statorice, defecte ale miezului statoric, probleme de alimentare, de împământare și circuite întrerupte. Dintre toate, cel mai ades întâlnim scurtcircuitarea spirelor, în urma distrugerii izolației.

4.2 Ecuația de diagnosticare a scurtcircuitelor cu ajutorul analizei de curent

Obiectivul constă în identificarea componentelor de curent din înfășurarea statorică, care depind numai de spirele scurtcircuitate și nu de alte considerente. Dintre toate studiile matematice referitoare la analiza grosimii întrefierului și la semnalul care cuantifică fluxul axial în vederea determinării existenței scurtcircuitelor, cele ale lui Tavner, Penmann și Thomson au dovedit că ecuația următoare reflectă cel mai bine existența în forma de undă a componentelor fluxului de curent care străbate întrefierul, care sunt funcție de spirele scurtcircuitate:

$$f_{st} = f_L \left\{ k \pm \frac{n}{p} (1 - s) \right\}$$

unde:

f_{st} = frecvența componentei care depinde de spirele scurtcircuitate

f_L – frecvența de alimentare

$n = 1, 2, 3, \dots$

$k = 1, 3, 5, \dots$

p = perechi de poli

s = factor de alunecare adimensional (Anexa 1).

Frecvențele la care apar aceste componente se vor modifica în funcție de sarcină și turație, după cum apreciază Thomson.

4.3 Exemplu

Tabel 4 – Frecvențe de defect posibile în diferite condiții de sarcină

Sarcină	Turație (RPM)	Alunecare	K=1	
			LSB	USB
Sarcina 0%	1485	0,01	25 Hz	75 Hz
Sarcină 100%	1380	0,08	27 Hz	73 Hz

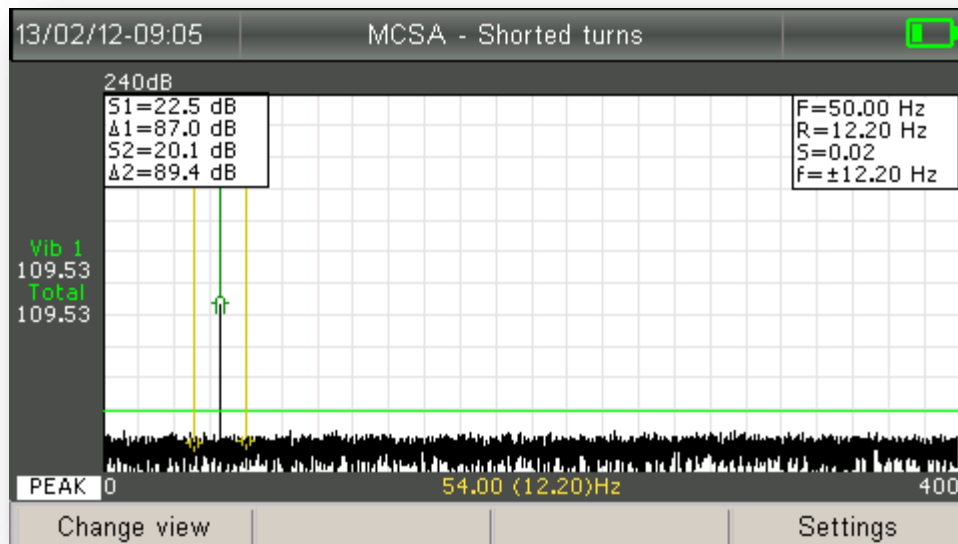


Fig. 9 - Motor în bună stare, care funcționează la încărcare maximă

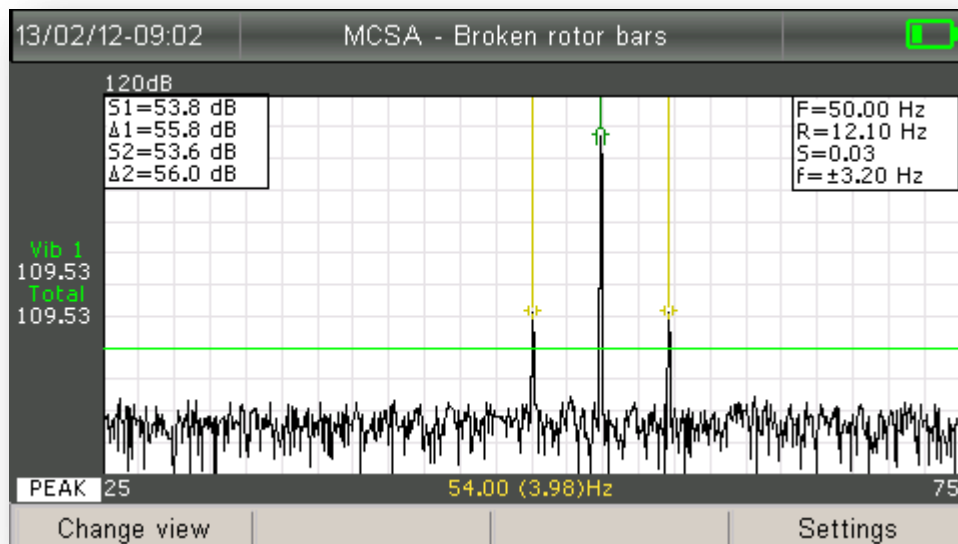


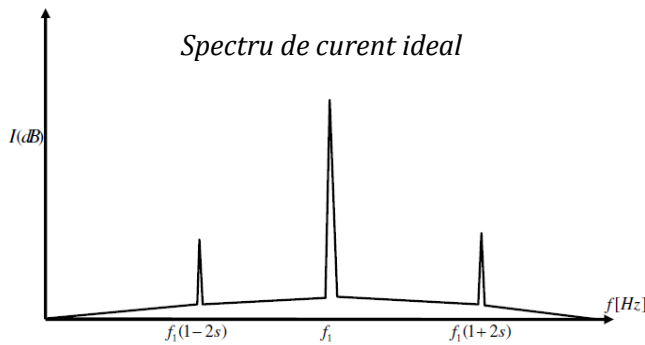
Fig. 10 - Motor defect (30% scurtcircuitat) în sarcină maximă

5 Concluzii

În concluzie, analiza de curent este un instrument foarte valoros în cadrul oricărui program de monitorizare a stării de funcționare a utilajelor. Este important să înțelegem limitările folosirii acestui tip de analiză, impuse de condițiile de sarcină, și anume atunci când motorul este insuficient încărcat, și este important să luăm toate măsurile logistice necesare pentru a obține date repetabile, care permit evaluarea evoluției în timp a motorului. Luând în considerare sarcina la care funcționează motorul atunci când efectuați analiza de curent, veți putea verifica rezultatele pe care le-ați așteptat în mod legitim de la analiza de curent. Când acestea se vor confirma, rezultatul se va concretiza în creșterea nivelului de încredere în acuratețea recomandărilor pe care le veți face echipei de întreținere, și în timp, în amortizarea investiției necesare implementării analizei de curent.

Anexa 1

Fundamentele apariției benzilor laterale la frecvența dublului alunecării datorită barelor rotorice rupte



Câmpul magnetic rotitor induce rotorului tensiuni și curenți la frecvența de alunecare. Dacă apare o asimetrie a rotorului față de stator, se va produce atunci și un câmp rotitor rezultat cu sens invers sensului de rotație al rotorului, la frecvența de alunecare. Acest câmp rotitor cu sens invers induce în stator o tensiune la frecvența corespunzătoare. Astfel, apare un curent suplimentar, care modifică spectrul inițial de

curent care străbate statorul.

În stare perfectă de echilibru, la motorul cu inducție care se rotește cu turație sincronă se dezvoltă câmpul magnetic rotitor cu sensul de rotație al motorului.

$$N_1 = \frac{120 \times F_L}{p}$$

unde F_L este frecvența de alimentare și p numărul de perechi de poli.

Factorul de alunecare se poate exprima astfel:

$$s = (N_1 - N)/N_1 \quad [1]$$

unde N este turația motorului cu inducție.

Dar turația de alunecare $N_2 = N_1 - N$

Introducând expresia lui N_2 în ecuația [1], obținem

Alunecarea $s = N_2/N_1$

Astfel, $N_2 = s \times N_1$

Deci $N_1 - N = s \times N_1$,

$$N = N_1 - s \times N_1$$

$$N = N_1(1 - s)$$

Turația câmpului magnetic rotitor de sens opus, apărut în rotor ca urmare a barelor rupte va fi:

$$N_B = N - N_2$$

$$N_B = N_1(1 - s) - s \times N_1$$

$$N_B = N_1 - N_1 \times s - s \times N_1 = N_1 - 2 \times N_1 \times s$$

$$N_B = N_1 - (1 - 2 \times s)$$

Exprimând ecuația anterioară în termeni de frecvență:

$$f_B = F_1 - (1 - 2 \times s)$$

De aceea, apar benzi laterale la $\pm 2s \times f_L$, de-o parte și de alta a frecvenței de alimentare:

$$f_B = (1 \pm 2s) \times f_L$$

Cele două benzi laterale, inferioară și superioară, se datorează în mod special barelor rupte și vibrațiilor rezultate de aici. De fapt, cercetările arată că barele rupte dau naștere de fapt unei secvențe de asemenea benzi laterale date de $f_B = (1 \pm 2Ks) \times f_L$.

BIBLIOGRAFIE

- **Neelam Mehala** – *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor using Motor Current Signature Analysis*, 2010
- **William T.Thompson, Ronald J. Gilmore** – *Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drivers*, 2003
- **Aditya Korde B.E (Elec)** - *On line Condition Monitoring of motors using electrical motor signature analysis*, 2002
- **Jason Bolte, CMRP** - *Motor Current Analysis (MCA) Test Results Can be Misleading if Drive Train Load Isn't Considered*, 2012 Reliabilityweb.com