



UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ



ANALIZA EFICIENȚEI ENERGETICE A INSTALAȚIILOR INDUSTRIALE

TEZĂ DE DOCTORAT

elaborată de

ing. Nicolae POPESCU

- rezumat -

Conducător științific:

Prof.dr.ing. Ion MIRCEA

Craiova, 2013



Preocupările constante ale cercetărilor în domeniul acționărilor electrice, vizează modernizarea echipamentelor și, în același timp, reducerea consumurilor energetice, prin aplicarea rezultatelor tehnologice de ultimă oră. Stadiul actual atins în domeniul acționărilor benzilor transportoare, prin implementarea alimentării cu energie electrică a motoarelor asincrone de la convertoare statice, permite obținerea unor rezultate satisfăcătoare din punct de vedere energetic, care conduc la reducerea semnificativă a consumurilor de energie electrică, concomitent cu funcționarea eficientă a motoarelor.

În acest context, lucrarea de față este de actualitate, tema de cercetare fiind axată pe două direcții generale de studiu:

- identificarea principalelor posibilități de modernizare a acționărilor benzilor transportoare mergând până la introducerea acționărilor cu turație variabilă;
- înlocuirea vechilor grupuri de acționare a sistemelor de benzi transportoare cu motoare noi, de construcție specială (cu turație redusă 80 rot/min comandate de convertizor static de tensiune și frecvență), eliminând din lanțul cinematic de acționare reductorul de turație.

Pentru reducerea consumurilor energetice industriale și, în special a consumurilor de energie electrică pentru antrenarea benzilor transportoare de mare capacitate, este importantă localizarea punctelor în care se pot face economii de energie.

În vederea atingerii obiectivelor propuse, activitatea de cercetare a fost împărțită pe mai multe etape:

- selectarea din literatura de specialitate a modelelor matematice care stau la baza aspectelor energetice ale acționărilor electrice;
- adaptarea acestor modele la cerințele de lucru a motoarelor electrice asincrone cu rotorul în scurtcircuit și realizarea unui program specializat de analiză energetică a acestora;
- realizarea de măsurători electrice în cadrul ștandului de probe pentru verificarea corectitudinii întocmirii modelelor matematice pentru analiza motoarelor electrice;
- efectuarea de măsurători comparative pe diferite tipuri de transportoare care au în componența lanțului cinematic motoare de acționare noi (comandate de convertizoare statice de tensiune și frecvență) și motoare de acționare vechi, prin achiziția de date de la aparatele de măsură montate pe transportoarele aceluiasi flux tehnologic și funcționând în același regim de lucru.

Lucrarea este structurată în 7 capitole, pe parcursul cărora sunt prezentate atât noțiuni teoretice relevante pentru domeniul eficienței energetice, cât și numeroase formule și relații matematice care stau la baza modelelor studiate, rezultatele obținute fiind centralizate sub formă tabelară și grafică. Teza este elaborată în conformitate cu metodologiile clasice de cercetare doctorală și cuprinde o listă bibliografică cu 96 de poziții și două anexe.

În **capitolul 1**, intitulat „*Probleme generale în energetica industrială*”, se face o clarificare a “problemei energiei” care, presupune o diferențiere a modului de studiere și analiză a acestei noțiuni în funcție de diversele etape de conversie și utilizare. Pe baza aspectelor



definitorii ale eficienței energetice și prin ilustrarea modului de variație a structurii consumului de energie în industria românească, pe o perioadă de 10 ani, au fost propuse măsuri tehnico-economice care vizează o creștere imediată a eficienței energetice.

Având în vedere faptul că folosirea rațională a energiei este o problemă foarte complexă, aflată într-o strictă interdependență cu toate domeniile tehnicii (economia, ecologia, dezvoltarea socială), gospodărirea rațională a energiei trebuie să urmărească:

- economisirea resurselor de energie primară;
- reducerea investițiilor și cheltuielilor de exploatare pentru instalațiile de extracție a energiei primare și de transformare a acesteia în alte forme de energie sau pentru transformări ale diverselor forme intermediare de energie, precum și în instalațiile de transport și distribuție a combustibililor, energiei electrice și termice;
- reducerea costului producției industriale, mai ales ale celei energointensive, unde cheltuielile pentru energie au o pondere importantă în cheltuielile totale;
- reducerea emisiilor poluante în mediul ambiant sub forma gazelor nocive rezultate din diverse procese și instalații tehnologice.

Capitolul 2, intitulat „*Principalele utilaje complexe utilizate în carierele de extracție a lignitului din România. Situația actuală*”, prezintă considerații generale privind procesul tehnologic de extragere a lignitului din carierele de suprafață. Tehnologia folosită în flux continuu, este practică peste tot în lume acolo unde există condiții similare de exploatare a zăcămintelor de suprafață și, impune asimilarea unor utilaje de mare productivitate precum: excavatoare cu roată cu cupe, transportoare de mare capacitate, mașini de haldat ș.a. Făcând referire strict la bazinul carbonifer al Olteniei, în acest capitol sunt prezentate caracteristicile funcționale principale pentru: excavatorul ERC 1400 30-7, tipurile de transportoare de mare capacitate utilizate pentru transportul materialului excavat, mașinile de haldat – tip abzețer, cărucioarele cu bandă, mașinile de depus și reîncărcat material excavat precum și mașinile de preluare a cărbunelui din depozit.

În ceea ce privește acționările utilizate la antrenarea transportoarelor cu bandă, din practică și din literatura de specialitate, se constată că la mecanismele ce compun utilajele de carieră, serviciul continuu este cel de bază, în timp ce serviciul de scurtă durată se întâlnește la mecanismele de ridicare-coborâre sau la cele de deplasare-întindere, care necesită o modificare în trepte a vitezei. Cea mai utilizată soluție de antrenare a transportoarele cu bandă este cea cu motor asincron cu rotorul în scurtcircuit, în varianta cu rezistență de pornire uscată sau cu reostat cu lichid. În cazul acestor soluții, pornirea poate fi controlată în funcție de viteză, timp sau curent. Ca soluție modernă de antrenare, se propune utilizarea acționărilor cu viteză variabilă în limite largi, prin alimentarea motorului asincron cu rotor în scurtcircuit de la un invertor de curent cu circuit intermediar de curent. Acest mod de acționare a sistemelor de benzi transportoare asigură o variație de viteză, un factor de putere bun, economie de energie și cuplu mare chiar și în situațiile de funcționare grea. Deoarece consumurile de energie electrică depind într-o oarecare măsură și de configurația sistemului de alimentare, în finalul capitolului sunt



prezentate schematic modalitățile de alimentare cu energie electrică a unei cariere de extracție de mică și mare capacitate în funcție de complexitatea fluxului tehnologic.

În **Capitolul 3**, intitulat „*Analiza energetică a consumului de energie electrică dintr-o carieră de lignit în situația actuală*”, sunt tratate aspecte teoretice generale referitoare la analizele și auditurile energetice. Pe baza literaturii de specialitate și a definițiilor generale a celor două noțiuni, în prima parte a capitolului sunt stabilite obiectivele și tipurile de analize, respectiv de audituri, care stau la baza determinării indicatorilor de eficiență energetică și economică. Pentru auditurile energetice, pe parcursul capitolului sunt prezentate succint principalele etapele care trebuie parcurse pentru realizarea unei astfel de lucrări pentru un obiectiv industrial..

Cum extracția lignitului în carierele de suprafață este un proces complex, în cadrul căruia se înregistrează, pentru principalele utilaje de extracție, consumuri ridicate de energie electrică, în ultima parte a acestui capitol, sunt prezentați comparativ, principalii indicatori energetici de consum la Carierele de extracție a cărbunelui din România – Berbești, Jilț Nord, Jilț Sud, Olteț, Peșteana, și Roșia (energie electrică activă, energie electrică reactivă, factor de putere, consumuri specifice), precum și variațiile acestora, pentru o perioadă de 12 luni de funcționare.

Ținând seama de nivelul ridicat al consumurilor de energie electrică înregistrat în carierele de extracție a lignitului, în **capitolul 4** intitulat „*Modele matematice pentru determinarea indicatorilor de eficiență energetică la sistemele de acționare*” sunt prezentate modele matematice pentru analiza energetică a funcționării sistemelor de transport (benzi transportoare) precum și un program pentru determinarea parametrilor de eficiență energetică la motoarele de acționare a transportoarelor cu bandă.

Primul model, cel destinat determinării parametrilor de eficiență energetică la sistemele de benzi transportoare, are la bază algoritmul de calcul a puterii electrice necesare motorului de antrenare a unui transportor cu bandă. Pe baza acestui algoritm, s-a recurs la realizarea, în concepție proprie, în Matlab – Simulink, a schemelor de variație a parametrilor funcționali ai benzilor transportoare.

Cel de-al doilea model, destinat determinării parametrilor de eficiență energetică la motoarele de acționare a transportoarelor cu bandă, are la bază caracteristicile de funcționare ale motoarelor asincrone utilizate pentru acționarea sistemelor de transport cu bandă în carierele de lignit. Având în vedere faptul că marea majoritate a motoarele care acționează sistemele de benzi transportoare au o vechime mai mare de 15 ani, deci au durată de funcționare depășită, pentru reducerea consumului de energie electrică se urmărește înlocuirea acestor motoare cu unele noi, eficiente din punct de vedere energetic. Implementarea noilor motoare în schema de acționare a benzilor transportoare de mare capacitate, conduce la economii de energie, aspect justificat prin prezentarea performanțelor energetice obținute în urma analizei funcționării a două variante modernizate de motoare.

Pentru determinarea parametrilor energetici la diferite grade de încărcare a motoarelor de antrenare a sistemului de benzi transportoare și în vederea efectuării unei analize reale asupra consumurilor de energie electrică a sistemelor de acționare a benzilor transportoare de mare capacitate, s-a folosit modelul matematic complet, transpus într-un program de calcul realizat cu ajutorul mediului de programare Visual Basic. Programul de calcul permite ca, pornind de la



schema echivalentă de calcul pentru motorul asincron, prin cele 6 ferestre de calcul să se poată determina indicatorii de eficiență energetică pentru motorul asincron cu rotorul în scurt circuit 630 kW/1000 rot/min, cu un număr de 24 poli, tip MAB 630, la care alimentare cu energie electrică se face prin intermediul unui convertizor de frecvență care asigură obținerea cuplului nominal echivalent cu cel de la arborele de cuplare al reductorului tip 2 KC-P-630.M (75800 Nm la turația de 80 rot/min și la frecvența de 16,6 Hz).

În finalul capitolului, valorile parametrilor pentru diferiți coeficienți de încărcare ai motorului, obținute cu programul de calcul, sunt verificate atât de măsurătorile efectuate în ștandul de probe cât și de valorile calculate de producător. Cum și variația puterii active absorbite, precum și ceilalți parametri se încadrează atât în curba obținută cu ajutorul analizoarelor de calitate a energiei, cât și în plajele de erori admise, se poate concluziona, că programul de calcul realizat este corect și viabil pentru efectuarea analizelor energetice.

Capitolul 5, intitulat „*Utilizarea convertizoarelor de tensiune și frecvență pentru acționarea motoarelor de antrenare a transportoarelor de mare capacitate*”, prezintă principalele caracteristici ale motoarelor de înaltă eficiență care le fac potrivite pentru acționare cu turație variabilă. Cum alegerea unui motor în vederea funcționării cu frecvență variabilă, necesită mai multe informații decât sunt necesare pentru un motor cu o singură turație (cum ar fi: turația maxim admisibilă, limitele cuplului ș.a.), pe parcursul acestui capitol, se face referire la aspecte legate de compatibilitatea cu motorul a convertizoarelor de tensiune și frecvență, efectele regimurilor anormale ale sistemului de alimentare, influența poluării armonice.

În capitol sunt tratate aspectele definitorii ale controlului vectorial al mașinii de inducție, fiind prezentate graful informațional și structura principal al unui sistem de control viteză, principiul controlului vectorial, diagrama fazorială a mașinii asincrone pentru regim staționar, precum și principalele ecuații care permit controlul fluxului în sistemele cu orientare după fazorul fluxului rotoric.

Ținând seama de faptul că reglarea vitezei motoarelor asincrone se poate realiza prin mai multe metode de modificare a vitezei de rotație (prin modificarea tensiunii de alimentare, prin comandă în circuitul rotoric, prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare), în finalul capitolului sunt prezentate strategiile ce pot fi utilizate pentru comanda sistemelor de acționare cu turație variabilă:

- comandă tensiune/frecvență - convertizor cu sursă de curent;
- comandă tensiune/frecvență - convertizor cu sursă de tensiune;
- comandă directă a vitezei - convertizor cu sursă de curent;
- comandă vectorială de flux cu traductor de flux - convertizor cu sursă de tensiune.

Pe parcursul capitolului se prezintă avantajele utilizării motoarelor asincrone alimentate de la convertoare statice de tensiune și frecvență, în acest scop prezentându-se principiile de bază pentru reglarea vitezei prin alimentare cu tensiune și frecvență variabilă, structura convertoarelor statice și principiile de comandă pentru reducerea conținutului de armonici. O concluzie generală ce se poate desprinde din analiza funcțională a diferitelor tipuri de convertizoare, este aceea că, în carierele de extracție a lignitului sunt pretabile mai multe tipuri de convertizoare statice de



frecvență, cel mai utilizat fiind convertizorul static de frecvență pentru controlul motoarelor asincrone cu rotor în scurtcircuit alimentate la 6kV tip DCMA-800K-VA06-100.

În **capitolul 6**, intitulat *“Evaluarea indicatorilor de performanță energetică a unui flux tehnologic de extracție a lignitului”*, se prezintă modelul general de analiză energetică și economică pentru un flux tehnologic de transport a masei miniere excavate, compus din patru tronsoane de benzi și dispunând de sisteme diferite de acționare (motor asincron cu rotorul în scurtcircuit antideflagrant - MAB 630 kW și convertizor static de tensiune și frecvență – CSTF, motor asincron cu rotorul în scurtcircuit de 630 kW cu construcție specială - 80 rot/min - și convertizor static de tensiune și frecvență – CSTF - fără reductor și, motor asincron cu rotorul în scurtcircuit - MIB 630 kW și convertizor static de tensiune și frecvență – CSTF). Pornind de la schema generală a fluxului tehnologic al unei cariere de suprafață, de la particularitățile pe care tehnologia de excavare, transport și haldare în flux continuu utilizată în exploatarea miniere de suprafață le prezintă, de la caracteristicile principale (constructive și funcționale) ale benzilor transportoare, pe baza datelor de catalog, datelor măsurate și calculate și algoritmului de calcul al pierderilor de energie electrică în elementele de rețea și în echipamentele electrotehnologice, s-au putut determina atât pierderile în motoarele de antrenare ale benzilor transportoare, cât și pierderile pe cablurile de alimentare ale acestora.

În efectuarea calculelor indicatorilor de eficiență energetică, s-a ținut seama de gradul de încărcare al fiecărui motor de antrenare, apreciat prin raportul dintre curentul real și curentul nominal și s-au utilizat relațiile matematice de calcul ale randamentului și a factorului de putere, prezente în literatura de specialitate. Pentru curentul absorbit de același motor, la aceeași sarcină dar alimentat cu tensiune și frecvență variabilă, a fost utilizat un set de valori rezultate în urma măsurărilor efectuate pe motor, pe un ștand de probe și, ulterior, pentru analiza reală a comportării unui astfel de motor, au fost efectuate măsurători pe fluxul tehnologic de transport al masei miniere, în condiții reale de funcționare. În condiții reale de funcționare, valoarea curentului absorbit de la rețea de către motorul (motoarele) de antrenare a benzilor transportoare, a fost corelată cu puterea electrică necesară sistemului de acționare a benzilor, rezultată din simulările realizate în Matlab – Simulink, în funcție de debitul de material transportat și de caracteristicile tehnico – constructive ale tronsoanelor de bandă studiate. Atât valorile puterii de antrenare rezultate prin calcul cât și a curentului absorbit de la rețea, au fost validate prin măsurătorile efectuate.

Capitolul 7, intitulat *“Calculul de eficiență economică a implementării acționărilor cu turație variabilă la sistemul de benzi transportoare”*, reprezintă partea de analiză economică a tezei, parte dezvoltată pe baza indicatorilor de eficiență economică specificați în literatura de specialitate (venitul net actualizat, rata internă de rentabilitate, durata de recuperare a investiției, rentabilitatea proiectului etc.). În vederea creșterii eficienței energetice, se propune măsura de înlocuire a motoarelor de antrenare a benzilor transportoare, cu motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit cu comandă prin convertizor de tensiune și frecvență, care ar avea ca efect principal reducerea consumurilor de energie electrică și, implicit, realizarea unor economii financiare.

Capitolul 8, intitulat „*Concluzii. Contribuții personale și posibilități de dezvoltare ulterioară a cercetărilor în domeniu*” prezintă succint principalele concluzii rezultate în urma cercetărilor efectuate, din care reiese îndeplinirea obiectivelor propuse prin direcțiile de cercetare. Dintre acestea, merită a fi menționate următoarele:

- contribuțiile personale aduse în dezvoltarea cercetărilor în domeniul eficientizării consumurilor energetice industriale pot fi structurate în: contribuții teoretice, software și experimentale;
- modelul matematic complet pentru determinarea indicatorilor energetici ce descriu funcționarea motoarelor asincrone la diferite grade de încărcare ale acestora, a fost adaptat la regimul specific de funcționare a motorului asincron cu rotor în scurtcircuit, 630kW, 80rot/min, comandat prin convertizor static de tensiune și frecvență, ceea ce a permis implementarea lui într-un program de calcul realizat în Visual Basic;
- prin compararea rezultatelor obținute cu ajutorul programului cu măsurătorile realizate pe ștandul de probe și cu datele de catalog ale motorului, au fost obținute valori în plaja admisibilă de eroare ($\pm 5\%$) ceea ce a permis validarea lor;
- implementarea, în scheme de modelare realizate în Matlab-Simulink, a modelului matematic pentru determinarea parametrilor de eficiență energetică la sistemele de benzi transportoare, a condus la obținerea de rezultate verificate prin măsurători în ceea ce privește variația puterii absorbite de la rețea de către motoarele de antrenare a benzilor. Aceste valori au fost utilizate ulterior la determinarea energiei utile și a pierderilor de energie;
- efectuarea calculelor s-a bazat pe valori reale ale debitelor de material transportat, precum și pe caracteristicile constructive ale tronsoanelor de bandă, acestea din urmă diferind funcție de amplasamentul fiecărui tronson în cadrul fluxului tehnologic;
- analiza comparativă a consumurilor reale de energie electrică pentru un număr mediu de 300 ore de funcționare/lună pentru tronsoanele de benzi transportoare T306H, T104H, T101H acționate cu motoare vechi și care au în componenta lanțului cinematic reductor de turație și tronsonul de bandă T105H antrenat de un motor de construcție specială comandat de un convertizor static de tensiune și frecvență fără reductor de turație, a evidențiat funcționarea eficientă a acestui tronson (energie electrică absorbită și pierderi de energie scăzute cu până la 46%);
- analiza eficienței economice, referitoare la implementare măsurilor de eficientizare a consumurilor de energie electrică, scoate în evidență faptul că soluția de înlocuire a motoarelor asincrone cu rotorul bobinat cu motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit comandate prin convertizor de tensiune și frecvență, permite recuperarea investițiilor într-o perioadă de timp relativ scurtă, ceea ce face ca aceste investiții să fie atractive financiar.

Doctorand,

Ing. Nicolae POPESCU