

**ASUPRA CARACTERISTICILOR DE
FUNȚIONARE ALE MOTOARELOR
ELECTRICE ALIMENTATE LA
FRECVENȚĂ VARIABILĂ**

Conf. univ. dr. ing. Constantin Tricikov
Univ. Mine și Geologie „Ivan Rilski” – Sofia,
Bulgaria

Ing. Machidon Alina – Universitatea
„Constantin Brâncuși” din Târgu-Jiu

Rezumat: în lucrare se prezintă unele aspecte legate de diferitele legi de reglare a turatiei motoarelor electrice cu frecvență variabilă de alimentare din sistemele de actionare.

Cuvinte cheie: motoare electrice, reglare a turatiei motoarelor, frecventa de alimentare din sistemele de actionare.

În sistemele cu frecvență variabilă a alimentării motoarele electrice funcționează după diferite legi de reglare a turatiei, care depind de caracterul sarcinii și de tipul sistemului. Pentru obținerea caracteristicilor necesare ale acționării este necesar a asigura variația tensiunii și frecvenței potrivit legilor corespunzătoare. În literatură sunt studiate diferite procedee de comandă a motoarelor în funcție de caracteristicile de funcționare ale mecanismului de execuție $M=\text{constant}$, $M\equiv 1/n$, $M\equiv n^2$. Prima lege este caracteristică acționării mecanismelor de ridicat, a doua pentru tracțiune și a treia pentru ventilatoare. Totodată, variația tensiunii și frecvenței se realizează în mod coordonat încât să fie obținute pierderile minime în motoare.

În funcționarea motorului alimentat de la convertor static de frecvență (CSF) și de la generator autonom este necesar a considera pierderile nu numai în motor dar și în generator și CSF. Asigurarea minimului pierderilor în toate acționările permite nu

**REFERRING TO THE WORKING
CHARACTERISTICS OF THE
ELECTRIC ENGINES POWERED BY A
VARIABLE FREQUENCY POWER
SUPPLY**

**Assoc. Prof. PhD. Eng. Constantin
Tricikov**–Mining and Geology Univ. „Ivan
Rilski” – Sofia, Bulgaria

Eng. Machidon Alina – „Constantin
Brâncuși” University of Târgu Jiu

Abstract: this paper presents some aspects about the different laws used to control the speed of the electric engines powered by a variable frequency power supply

Key words: electric engines, control of the speed of the engines, frequency power supply.

In systems with variable frequency power supply, electric motors work by different laws regulating the speed, which depend on the task and the system type. To obtain the necessary working characteristics it is necessary to ensure voltage and frequency variation according to appropriate laws. In literature different procedures are studied to command motors depending on the working mechanism characteristics: $M=\text{constant}$, $M\equiv 1/n$, $M\equiv n^2$. The first law is for lifting mechanisms, the second for traction mechanisms and the third for fans. However, voltage and frequency variation are achieved for obtaining the minimum amount of losses.

In operating the motor powered by a static frequency converter (SFC) and a self-generator it is necessary to consider not only losses in the motor but also those in the generator and SFC. Ensuring minimum losses allows not only to reduce energy consumption (and thus heat) but also choosing equipment with smaller dimensions. In addition, choosing

numai reducerea consumului de energie (deci și a căldurii), dar și alegerea echipamentului cu gabarit mai mic. Pe lângă aceasta, alegerea legii de variație a tensiunii și frecvenței trebuie să se bazeze și pe domeniul necesar de variație al turației motorului. În particular, pentru acționarea tracțiunii este necesar a regla turația motorului deasupra și sub cea nominală la putere constantă.

Aplicarea legii clasice $U \equiv \sqrt{f}$ în acest caz nu este utilă, deoarece creșterea tensiunii peste cea nominală conduce la necesitatea creșterii puterii staționare a generatorului și ridicării clasei tiristoarelor CSF. De aceea se ajunge la limitarea tensiunii la valoare stabilită a frecvenței.

În cazul general este necesar a se tinde la reducerea curenților de sarcină în acționări ca și în regimurile staționare, dar și în procesele de pornire, reversare, frânare și de variație a turației motorului. Pentru realizarea acestei condiții la sarcini, apropiate de cele nominale, este util a se menține fluxul din întrefierul mașinii egal cu cel nominal, iar la suprasarcini a îl crește la limita, stabilită de saturația admisibilă a motorului și de optimul pierderilor în el. Prin această reglare curentul motorului va fi minim în condițiile date, iar momentul – maxim. În aceste condiții se asigură de asemenea timpul minim al proceselor tranzitorii, dacă se pornește de la curentul de suprasarcină stabilit.

Pentru asigurarea fluxului constant la frecvențe, apropiate de cea nominală sau superioare ei, se poate varia tensiunea potrivit legii $U \equiv f$. La reducerea frecvenței pentru compensarea creșterii relative a căderii de tensiune pe rezistența statorului, reducerea tensiunii trebuie să aibă loc într-o măsură mai mică decât a frecvenței. La suprasarcini, de asemenea este de dorit a crește raportul U/f în comparație cu regimul nominal. Astfel, spre exemplu, la frecvențe de 2-5 Hz valorile utile ale raportului U/f ajung la de doua ori și mai mult în raport cu cele nominale.

Raportul U/f în aceste cazuri se determină pornind de la următoarele

the law of voltage and frequency variation should be based on the necessary variation domain of the motor's speed. In particular, for traction power it is necessary to adjust the motor's speed above and below the nominal value, while the power remains unchanged.

The enforcement of the classical law $U \equiv \sqrt{f}$ in this case is not useful, because the increase of the voltage over the nominal value leads to the increase of the stationary power of the generator and also to the change of the thyristor in the SFC circuit with a better one. Therefore it comes to limiting the amount of voltage according to frequency.

Generally, for operating a motor efficiently, it is necessary to reduce the load currents as in the stationary regimes, but also in the start, reverse, braking and speed variation regimes. To achieve this condition for load currents (close to nominal) it is useful to maintain the flux of the coil equal to the nominal value and on overload to increase it to the limit allowable by the motor's allowable saturation and the optimum losses in it. With this adjustment the motor current will be minimum and moment - maximum. Under these conditions, if a motor starts with an established overload current, the minimum amount of time for transitional process is also ensured.

To ensure constant flow at frequencies (close to nominal or higher) the voltage may vary according to $U \equiv f$ law. When the frequency is reduced, to compensate for the relative growth of the voltage drop on the stators resistance, the voltage should be reduced less than frequency. At overload, compared to nominal regime, is also desirable to increase the U/f rapport. Thus, for example, at 2-5 Hz frequencies the U/f rapport values reach twice or more higher against the nominal values.

In these cases the U/f rapport is determined based on the following considerations: normal for electric motors at nominal load, losses in copper (load dependent) are higher than iron and

considerente: obișnuit în mașinile electrice la sarcină nominală pierderile în cupru (dependente de sarcină) sunt mai mari decât pierderile în fier și mecanice (în prima aproximație ele se pot considera ca independente de sarcină), deși randamentul maxim se obține la egalitatea lor.

La suprasarcini, diferența dintre ele este sensibil mai mare. De aceea este util a crește fluxul în mașină, crescând în felul acesta pierderile în fier și reducând pierderile în cupru la unul și același moment de sarcină. Limitarea comenzii asemănătoare pentru motorul asincron este creșterea curentului lui de magnetizare și măsura influenței acestui curent asupra pierderilor în cupru. La frecvențe mici, când pierderile în fier și mecanice sunt neînsemnate, creșterea curentului de magnetizare este unica cauză, ce limitează forțarea fluxului.

Pentru flux determinat al motorului, o mică creștere a lui, conduce la acea amplificare a curentului de magnetizare, încât influența lui asupra pierderilor în cupru se arată mai esențială, decât reducerea curentului activ, adică pierderile în cupru încep să crească.

La creșterea frecvenței alimentării peste cea nominală, este util a limita tensiunea. În acest caz fluxul se reduce, de asemenea se reduce și momentul motorului. Dacă este necesar a menține constantă puterea, atunci se poate admite reducerea momentului invers proporțional cu frecvența ($P \equiv M/f = \text{const.}$). După cum este cunoscut, capacitatea de suprasarcină K_M a motorului practic se reduce, dacă tensiunea și frecvența se modifică potrivit legii $U \equiv \sqrt{f}$. Dacă în etapa stabilită a reglării, tensiunea a atins maximul valorii admise pentru sistemul de acționare dat și în continuare la reglare crește numai frecvența, atunci capacitatea de suprasarcină a motorului se reduce: $K_M = 1/f$.

Această dependență determină limita admisibilă de creștere a frecvenței, deoarece reducerea lui K_M mai jos de 1,2-1,3, nu este admisă. Aceste valori mici pentru K_M sunt

mechanical losses (in the first approximation they can be considered as independent from load), although the maximum efficiency is obtained from their equality.

At overload, the difference between them is considerably higher. Therefore it is useful to increase the flow in the engine, thereby increasing the losses in iron and reducing them in copper, at the same load. For the asynchronous engine, in the same conditions, the magnetization current is increased and its influence on the copper losses is measured. At low frequencies, when iron and mechanical losses are insignificant, the increase of magnetization current is the unique cause that limits forcing the flow.

A small increase of a determined flux in the engine leads to the amplification of the magnetization current, and so its influence over copper losses is more essential than the reduction of the active current, ie the copper losses begin to grow.

If the frequency of the power supply is increased over the nominal value, it is useful to limit the voltage. In this case the flux and the moment of the engine are reduced. If it is necessary to maintain constant the power, then the moment can be reduced inversely proportional to frequency ($P \equiv M/f = \text{const.}$). As is known, the overload capacity K_M of the engine is practically reduced if voltage and frequency vary according to $U \equiv \sqrt{f}$ law. If the voltage reached the maximum amount allowed, for a given system, and only the frequency grows in the controlling stage, then the overload capacity of the engine is reduced:

$$K_M = 1/f.$$

This dependence determines the allowable growth rate of the frequency as the reduction of K_M below 1,2-1,3 is not allowed. These low values for K_M are allowed in closed systems, since in these cases high overload capacities of the engines for any frequency are not necessary, because their reversing is excluded by the automatic system that protects the primary engine on overload.

Thus obtaining the necessary

admise în sistemele închise, deoarece în aceste cazuri nu sunt necesare capacități de suprasarcini înalte ale motoarelor pentru orice frecvență, deoarece bascularea lor se exclude de sistemul de reglare automată care protejează motorul primar la suprasarcină.

Astfel obținerea caracteristicilor necesare acționării în sistemele cu frecvență variabilă se realizează prin variația frecvenței și tensiunii potrivit unei legi destul de complicate. Totodată, pentru analiza generală a pierderilor și randamentului motorului la frecvență variabilă de alimentare se poate utiliza legea clasică de comandă:

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}$$

În acest caz, motorul într-un domeniu suficient de mare al vitezei funcționează cu η , $\cos \varphi$ și K_M practic neschimbați. Puterea relativă a mașinii se poate exprima în felul următor:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{f}{f_n} \frac{M}{M_n}$$

Pierderile în cupru:

$$\frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} \approx \frac{M}{M_n}$$

Pierderile prin histerezis și curenți turbionari:

$$\frac{P_H}{P_{Hn}} = \frac{f}{f_n} \cdot \frac{M}{M_n}; \quad \frac{P_{CT}}{P_{CT.n}} = \frac{f^2}{f_n^2} \cdot \frac{M}{M_n}$$

Pierderile mecanice se modifică aproximativ proporțional cu pătratul vitezei:

$$\frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \frac{f^2}{f_n^2}$$

La moment constant sunt valabile următoarele relații:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{f}{f_n}; \quad \frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = 1; \quad \frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2$$

$$\frac{P_H}{P_{Hn}} = \frac{f}{f_n}; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \left(\frac{f^2}{f_n^2}\right)^2;$$

characteristics in operating systems with variable frequency is achieved through frequency and voltage variation according to a law rather complicated. And for general analysis of the losses and engine efficiency at variable frequency power supply, to control the engine the following classic law can be used:

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}$$

In this case, when the engine's speed varies in a large enough area, the engine has η , $\cos \varphi$ and K_M virtually unchanged. Relative power of the engine can be expressed as follows:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{f}{f_n} \frac{M}{M_n}$$

Losses in copper:

$$\frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} \approx \frac{M}{M_n}$$

Hysteresis and eddy current losses:

$$\frac{P_H}{P_{Hn}} = \frac{f}{f_n} \cdot \frac{M}{M_n};$$

$$\frac{P_{CT}}{P_{CT.n}} = \frac{f^2}{f_n^2} \cdot \frac{M}{M_n}$$

Mechanical losses are approximately proportional to the square value of speed:

$$\frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \frac{f^2}{f_n^2}$$

When the moment is constant the following relationships are valid:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{f}{f_n}; \quad \frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = 1;$$

$$\frac{P_H}{P_{Hn}} = \frac{f}{f_n}; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \left(\frac{f^2}{f_n^2}\right)^2;$$

$$\frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2$$

As can be seen, when current's

După cum se vede, pierderile în cupru la creșterea frecvenței curentului și turației motorului nu se schimbă, iar pierderile în fier și mecanice se amplifică. Pierderile totale cresc mai repede, cu cât este mai mare raportul $\frac{P_{Fe} + P_{mec}}{P_{cu}}$ la frecvență nominală.

Pentru putere utilă constantă a motorului avem:

$$\frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = \frac{f_n}{f}; \quad \frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2;$$

$$\frac{P_H}{P_{H.n}} = 1; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \frac{f}{f_n}$$

Analiza expresiilor prezentate arată, că pierderile în cupru la frecvențe ridicate ale curentului scad, iar pierderile în fier și mecanice cresc. Cu cât este mai mare la frecvență nominală raportul $\frac{P_{cu}}{P_{Fe} + P_{mec}}$, cu atât este mai mare randamentul motorului în cazul creșterii vitezei și cu atât mai mic este η în cazul reducerii.

Pentru sarcină de ventilator $\left(\frac{M}{M_n} = \frac{f^2}{f_n^2}\right)$ avem:

$$\frac{P}{P_n} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^3; \quad \frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2; \quad \frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2$$

$$\frac{P_H}{P_{H.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^3; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^4$$

Reducerea pierderilor în cupru și a pierderilor mecanice la reducerea frecvenței are loc mai lent decât puterea la arbore, iar a pierderilor în fier – mai repede. Totuși reglarea turației în cazul dat se poate realiza numai sub cea nominală, deoarece fluxul magnetic este proporțional cu frecvența, iar saturația mașinii la frecvență nominală este suficient de importantă. În consecință, randament mai mare și pierderi mai mici poate

frequency and engine speed are increased the losses in copper do not change, and the iron and mechanical losses are amplified. Total losses increase the faster, the higher the ratio $\frac{P_{Fe} + P_{mec}}{P_{cu}}$ at nominal frequency.

For useful power of the engine, we have:

$$\frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = \frac{f_n}{f};$$

$$\frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2;$$

$$\frac{P_H}{P_{H.n}} = 1; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \frac{f}{f_n}$$

The analysis of the expressions shows that the copper losses at high frequency current decline and iron and mechanical losses increase. The higher the nominal frequency ratio $\frac{P_{cu}}{P_{Fe} + P_{mec}}$ is, the higher the efficiency of the engine, when the speed is increased, is; and the lower the ratio, the lower the efficiency η .

For fan load $\left(\frac{M}{M_n} = \frac{f^2}{f_n^2}\right)$, we have:

$$\frac{P}{P_n} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^3;$$

$$\frac{P_{cu}}{P_{cu.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2; \quad \frac{P_{mec}}{P_{mec.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2$$

$$\frac{P_H}{P_{H.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^3; \quad \frac{P_{C.T}}{P_{C.T.n}} = \left(\frac{f}{f_n}\right)^4$$

Reducing copper and mechanical losses, when the frequency is reduced, is slower than the shaft power and the iron losses - faster. However, adjusting speed in this case can only be achieved below the nominal value, because magnetic flux is proportional to

avea acel motor, la care la frecvență nominală, pierderile în fier sunt mai mari.

După cum se vede din relațiile prezentate, în toate cazurile la reducerea turației pierderile în fier și cele mecanice scad; pierderile în cupru care sunt în esență pierderi termice, se modifică proporțional cu momentul. De aceea, dacă motorul funcționează cu ventilație forțată, în toate cazurile (cu excepția acționărilor de tracțiune) la reducerea turației se asigură funcționarea de durată a motorului în regimul dat. La acționările de tracțiune $\left(M \equiv \frac{1}{n}\right)$ în acest caz se admit numai regimurile se scurtă durată.

Sarcina motorului cu autoventilație la reducerea turației poate fi redusă la domeniul, determinat de pierderile și intensitatea răcirii, ori de timpul de funcționare.

La turații ridicate sarcina motorului cu autoventilație într-un domeniu larg poate fi păstrată la nivelul nominal. Sarcina motorului cu ventilație forțată la creșterea turației la acționările de ridicat trebuie oarecum micșorată.

Bibliografie:

1. **A.E.Zagorski:** Motoare electrice de frecvență variabilă; ed. Energia, Moscova, 1975
2. **A.E.Aleckseev:** Mașini electrice de tracțiune și convertoare, Ed. a II-a revizuită, Moscova, 1976

frequency, and saturation in the machine at nominal frequency is sufficiently important. Therefore, higher efficiency and lower losses can have the engine to which, at nominal frequency, the iron losses are higher.

As can be seen from the relations presented, in all cases, if the speed is reduced iron and mechanical losses decrease; copper losses are essentially heat loss and they change proportionally to the moment. Therefore, if the engine works at forced ventilation, in all cases (except for traction control), reducing the speed ensures long term function of the engine in the given regime. In traction control $\left(M \equiv \frac{1}{n}\right)$ are allowed only short-term regimes.

The self ventilation engine load at decreasing speed can be reduced to the domain determined by the losses and the intensity of the cooling, or the working time.

At high speeds the self ventilation engine load, in a wide range, can be maintained at nominal value. Forced ventilation engine load should be somewhat reduced at increased speed in lifting commands.

Bibliography:

1. **A.E.Zagorski:** Variable Frequency Electric Motors; ed. Energia, Moscova, 1975
2. **A.E.Aleckseev:** Traction Electric Engines and Convertors, Ed. a II-a revizuită, Moscova, 1976