

ВЪРХУ ТЕМПЕРАТУРНИЯ РЕЖИМ НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ, ЗАХРАНВАН ОТ УПРАВЛЯЕМ ИНВЕРТОР

Константин Тричков

Боряна Петрова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
София 1700, България

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски"
София 1700, България

РЕЗЮМЕ

Разглежда се нагряването на асинхронен двигател като ограничаващ фактор при честотното му управление. Изследват се възможности за конструктивно оптимизиране на двигателя с оглед максималното му използване при работа в зададен честотен интервал.

ПОСТАНОВКА НА ВЪПРОСА

Съвременните възможности за управление на асинхронните двигатели поставят редица нови проблеми, свързани със загубите в двигателя и нагряването му. Измененията на големината и честотата на захранващото напрежение в много широки граници изискват формулирането на по-широки критерии при оптимизирането на загубите в медта и стоманата. Както е известно от Електрическите машини, Костенко и Пиотровский, когато асинхронният двигател се захранва с номинално напрежение с номинална и неизменна честота, оптималното проектиране изисква при номинален товар загубите в стоманата и медта да са близки по големина. Ако същият двигател е захранван от управляем инвертор, работи в установен режим и при по-ниски честоти на въртене, топлинният баланс се изменя съществено. От една страна загубите в стоманата на статора се намаляват значително, тъй като приблизително са пропорционални на квадрата на честотата. Загубите в медта се определят от квадрата на тока, който зависи от честотата и големината на захранващото напрежение, а то също подлежи на регулиране. От друга страна при ниска честота на въртене се влошава вентилацията, а от там и охлаждането, освен ако не се използва независим вентилатор. Следователно в разглеждания случай се налага преоценка на конструктивно определените загуби на двигателя с оглед по-доброто му използване в целия диапазон на регулиране. При анализа на така поставения проблем за критерий се приема максималното повишаване на възможностите на двигателя, по-конкретно на извършената механична работа за дълъг период от време при различни установени честоти на въртене. При това в тази статия КПД на системата изправител – инвертор – двигател не се приема за допълнителен критерий., т.е. не се търси и оптимална енергийна ефективност на системата.

ФОРМУЛИРАНЕ НА ОПИМИЗАЦИОННАТА ЗАДАЧА

Топлинният баланс на статора на двигателя се изразява със следния израз $P_{ст} + P_{мед} = P_{охл}$, където $P_{ст}$ и $P_{мед}$ са загубите в стоманата и медта, а $P_{охл}$ е мощността, отделена вследствие на охлаждането. Загубите от механично триене са значително по-малки и се пренебрегват.

Както е известно в Електрически машини, Ангелов и Димитров, с по-голямо приближение може да се напише: $P_{ст} = K_{ст} \cdot U^2 \cdot f^2$ и $P_{мед} = K_{мед} \cdot I^2$, където коефициентите $K_{ст}$ и $K_{мед}$ зависят от конструкцията на двигателя.

Първоначално ще бъде разгледан случаят, когато охлаждането на двигателя се извършва от независим вършен вентилатор и следователно $P_{охл} = const$ не зависи от променливата честота f на захранващото напрежение. В този случай използваемостта на двигателя е значително по-добра, особено при малка стойност на долната граница на честотата.

От заместващата схема на асинхронния двигател Електрически машини, Ангелов и Димитров, с достатъчна точност може да се напише следния израз за тока (при работа с нормално хлъзгане):

$$I = \frac{Uf_n}{U_n f} I_n, \text{ където с индекс "н" са означени}$$

номиналните стойности на величините.

След заместване в уравнението на топлинния баланс се получава:

$$U^2 = \frac{f^2 P_{охл}}{K_{ст} f^4 + K_{мед} \frac{f_n^2}{U_n^2} I_n^2}.$$

Въртящият момент M на двигателя при напрежение U и честота f се определя от израза: $M = M_n \frac{U^2 f_n^2}{U_n^2 f^2}$.

Поради малката стойност на хлъзгането при нормална работа може да се приеме $f_2 \approx f_1$ и за механичната мощност се написва:

$$P_{мех} = 2\pi f_1 M = 2\pi M_n \frac{U^2 f_n^2}{U_n^2 f^2}.$$

Ако се приеме, че всички честоти f на установения режим в интервала от f_{min} до f_{max} са еднакво вероятни, то за определен дълъг период на експлоатация двигателят ще даде максимална механична работа A , когато е

изпълнено условието: $A = \int_{t_1}^{t_2} P_{мех} dt = Max$, където t_2

– t_1 е експлоатационния срок. След някои преобразования може да се формулира следната задача: асинхронен двигател трябва да работи с различни, еднакво вероятни честоти в диапазона от f_{max} до f_{min} . Изхожда се от прототип на асинхронния двигател със зададени номинални характеристики. Какви промени в стойностите на коефициентите $K_{ст}$ и $K_{мед}$ трябва да се реализират по конструктивен път, така че:

$$J = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{f P_{охл}}{K_{ст} f^4 + K_{мед} \frac{I_n^2 f_n^2}{U_n^2}} df = Max.$$

РЕШЕНИЕ НА ЗАДАЧАТА

При зададени габарити на двигателя може да варира съотношението между сеченията на магнитопроводите и намотките. Нека сечението на магнитопровода получи някакво малко изменение $S_{ст} = \frac{S_{ст.н}}{1 + \epsilon}$, където

$|\epsilon| \ll 1$. С първо приближение може да се приеме, че при това общото сечение на намотката ще получи противоположно по характер изменение $S_{мед} = S_{мед}(1 + \alpha)$, което води при същия брой навивки до съответно изменение на сечението на всеки проводник $S_{np} = S_{np.н}(1 + \epsilon)$. Тези промени влияят върху коефициентите $K_{ст}$ и $K_{мед}$ по следния начин. При неизменен магнитен поток магнитната индукция B получава изменение $B = B_n(1 + \epsilon)$. Това променя загубите във феромагнитния материал за единица тегло:

$P_{ст1} = P_{ст.н1}(1 + \epsilon)^2$. От друга страна общото тегло на магнитопровода G също се променя: $G = \frac{G_n}{1 + \epsilon}$.

Следователно загубите в стоманата се определят от израза: $P_{ст} = P_{ст.н}(1 + \epsilon)$ или

$K_{ст} = K_{ст.н}(1 + \epsilon)$. Аналогично се написва: $K_{мед} = \frac{K_{мед.н}}{(1 + \epsilon)}$.

Необходимо е да се определи стойността ϵ , така че да е изпълнено условието $J = Max$.

След извършване на интегрирането и диференцирането по отношение величината $x = 1 + \epsilon$, производната се приравнява към нула. При това се

получава: $\epsilon_{max} = \frac{f_n^2}{f_{max} f_{min}} \sqrt{\frac{P_{мед.н}}{P_{ст.н}}} - 1$.

До същия резултат се стига и при допускането, че магнитопроводът на двигателя е със зададени параметри, а се изменя броят на навивките w . Нека този брой за изходния двигател е w_0 . При нова стойност w и запазване на всички геометрични параметри магнитната индукция в

магнитопровода получава нова стойност $B = B_0 \frac{w_0}{w^2}$.

Загубите в медта зависят от съпротивлението R на намотката: $P_{мед} = RI^2$. Това съпротивление зависи от броя w на навивките чрез общата дължина $l = l_1 w$ и

чрез сечението на проводника $S_{np} = \frac{\Delta}{w} K_3$, където l_1 е

средната дължина на една навивка, а Δ е общото напречно сечение на бобината. Следователно

$$P_{мед} = P_{мед0} \frac{w^2}{w_0^2}. \text{ От тук следва, че при неизменна}$$

конструкция на двигателя, големината на загубите в стоманата може да нарасне x пъти чрез съответно изменение на броя на навивките и при това загубите в медта намаляват приблизително x пъти, т. е. Ако

$$P_{ст} = xP_{ст0}, \text{ то } P_{мед} = \frac{1}{x} P_{мед0}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Препоръчана за публикуване от катедра
"Електрификация на минното производство" на МЕМФ

Получените резултати са постигнати въз основа на някои приблизителни предположения. Независимо от това те правилно отразяват тенденцията, която трябва да се спазва при проектирането с оглед на подобряване на използваемостта на двигателя. Написаните зависимости дават възможност да се търси оптимизация и за случаи, когато се очаква и някакво неравномерно разпределение на честотите по време на експлоатационния срок, апроксимиран въз основа на прогнозни предположения.

ЛИТЕРАТУРА

Костенко, М. П., Л. М. Пиотровский. Электрические машины – ч. I и ч. II, Энергия, 1973
Ангелов, А., Д. Димитров. Электрически машини – част I., С., Техника, 1976 г.

ABOUT THE TEMPERATURE REGIME OF AN INDUCTION MOTOR, SUPPLIED BY A CONTROLLED INVERTER

Konstantin Trichkov

Boriana Petrova

*University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria*

*University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria*

ABSTRACT

The heating of the induction motor that aggravates its frequency control is a subject of this article. With a view the motor to be used to the highest degree when it runs in a preset frequency range, some possibilities for an optimization of the motor construction are examined.

FORMULATION OF THE PROBLEM

The modern means of the induction motors control put a number of new problems about the losses in the motor and its heating. The value and the frequency variations in the supply voltage within very large limits require the formulation of a larger criterion of the loss optimization in the copper and the steel. As it is known in [1], when the induction motor is supplied with a rated voltage with a constant and unchanging frequency, the optimal designing requires, if the load is rated, the losses in the copper and the steel to be with close values. If the motor concerned is supplied by a controlled inverter, works in a steady-state regime and the rotation frequency is low, the heating balance changes considerably. On the one hand the losses in the steel of the motor decrease considerably, as they are approximately proportional to the square of the frequency. The square of the current, which depends on the frequency and on the value of the supply voltage, that is also liable to control, determines the losses in the copper. On the other hand, when the rotation frequency is low, the ventilation deteriorates, which leads to deterioration of the cooling, unless an independent fan is used. Consequently, in the case in question, a

reevaluation of the constructionally determined losses in the motor is necessary with a view to its better use in the whole control range. In the analysis of the so put question, the maximum enhancement of the motor possibility, more exactly the mechanical work accomplished for a long period of time with different settled rotation frequencies, is accepted for criterion. Besides in this article the efficiency of the rectifier - inverter – motor system is not accepted as an additional criterion, i.e. the optimum power effectiveness of the system is not sought.

FORMULATION OF THE OPTIMIZATION PROBLEM

The heating balance of the stator is expressed with the following formula $P_{st} + P_{cop} = P_{cool}$, where P_{st} and P_{cop} are the losses in the steel and the copper, and P_{cool} is the power emitted as a result of the cooling. The frictional losses are deliberately less and they have to be ignored.

As it is known in [2] if the approximation is greater, the formulas will be the following: $P_{st} = K_{st} \cdot U^2 \cdot f^2$ and $P_{cop} = K_{cop} \cdot I^2$, where K_{st} and K_{cop} depend on the motor construction.

At first the case, when an independent external fan accomplishes the cooling of the motor, will be examined and consequently $P_{cool} = \text{const}$ does not depend on the variable frequency f of the supply voltage. In the case in question the motor can be used much better especially when the lower frequency limit value is low.

The following formula about the current can be determined with a sufficient precision from the equivalent circuit of the induction motor [2] (when the sliding is normal):

$I = \frac{Uf_n}{U_n f} I_n$, where the index "n" means the rated values of the quantities.

When a substitution in the equation about the heating balance is accomplished the following formula comes out:

$$U^2 = \frac{f^2 P_{cool}}{K_{st} f^4 + K_{cop} \frac{f_n^2}{U_n^2} I_n^2}$$

The torque of the motor, when the voltage is U and the frequency f , is determined by the equation:

$$M = M_n \frac{U^2 f_n^2}{U_n^2 f^2}$$

Because of the small value of the sliding, when the operation is normal, it can be accepted that $f_2 \approx f_1$ and the mechanical power is:

$$P_{mec} = 2\pi f_1 M = 2\pi M_n \frac{U^2 f_n^2}{U_n^2 f^2}$$

If it is accepted that all of the frequencies f of the steady-state regime in the range between f_{min} and f_{max} , are equally possible, the motor will produce maximal mechanical work "A" during a definite long period of time. It may

happen if $A = \int_{t_1}^{t_2} P_{mec} dt = \text{Max}$, where $(t_2 - t_1)$

is the service life. After some transformations the following problem can be formulated: an induction motor has to operate with different, equally possible frequencies in the range between f_{min} and f_{max} . It is based on a prototype of an induction motor with preset rated characteristics. What changes about the values of the factors have to be constructionally realized in order the following equation to be observed?

$$J = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{f P_{cool}}{K_{st} f^4 + K_{cop} \frac{I_n^2 f_n^2}{U_n^2}} df = \text{Max}.$$

SOLUTION OF THE PROBLEM

When the overall dimensions are determined, the correlation between the cross-sections of the magnetic cores and the windings can vary. Let the cross-section of the magnetic cores changes a little, for example $S_{st} = \frac{S_{stn}}{1 + \varepsilon}$, where $|\varepsilon| \ll 1$.

1. With a first approximation it can be accepted that the total cross-section of the winding will receive opposite, by nature, change $S_{cop} = S_{cop}(1 + \alpha)$, which leads to a relevant change in the cross-section of each conductor $S_{con} = S_{con.n}(1 + \varepsilon)$ when the number of the windings is the same. These changes affect on the factors K_{st} and K_{cop} in the following way. When the magnetic flux is constant, the magnetic induction "B" changes as follows $B = B_n(1 + \varepsilon)$. As a result the losses in the ferromagnetic material change per unit of weight – $P_{st1} = P_{st.n1}(1 + \varepsilon)^2$. On the other hand the overall weight of the magnetic core "G" changes as well $G = \frac{G_n}{1 + \varepsilon}$. Therefore the losses in the

steel are determined by the following equations: $P_{st} = P_{st.n}(1 + \varepsilon)$ or

$K_{st} = K_{st.w}(1 + \varepsilon)$. By analogy

$$K_{cop} = \frac{K_{copn}}{(1 + \varepsilon)}$$

It is necessary the value of ε to be determined so as the equation $J = \text{Max}$, to be realized.

After integrating and differentiating in respect of the value $(1 + \varepsilon)$. The derivative is reduced to zero. As a result the following formula comes out:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{f_n^2}{f_{\max} \cdot f_{\min}} \sqrt{\frac{P_{copn}}{P_{st}}} - 1$$

The same result comes out assuming that the magnetic core is with preset parameters, but the number of the windings "w" changes. Let this number for the initial motor be "w₀". In case of a new value "w" and when all of the overall dimensions are the same, the magnetic induction has got a new value

$B = B_0 \frac{w_0}{w^2}$. The losses in the copper

depend on the resistance R of the winding:

$P_{cop} = R \cdot I^2$. This resistance depends on the number w of windings through both

the overall length $l = l_1 \cdot w$ and the cross-section of the conductor $S_{con} = \frac{\Delta}{w} K_l$, where l_1 is the average length of a winding and Δ is the total cross-section

of the coil. Therefore $P_{cop} = P_{cop0} \frac{w^2}{w_0^2}$. As

a result, when the motor construction is instant, the values of the losses in the steel can increase x-times through a relevant change in the numbers of the windings and the losses in the copper decrease approximately x-times i.e. if

$P_{st} = xP_{st0}$, then $P_{cop} = \frac{1}{x} P_{cop0}$.

CONCLUSIONS

The results obtained are achieved on the basis of some approximate suppositions. Nevertheless they correctly reflect the tendency, that has to be observed during the designing with a view to the improvement in the use of the motor. The equations shown above, also afford an opportunity an optimization to be sought when some irregular distributions of the frequencies are expected during the service life. That has been accomplished on the basis of prognosis suppositions.

REFERENCES

- Костенко, М. П., Л. М. Пиотровский. Электрические машины – ч. I и ч. II, Энергия, 1973
 Ангелов, А., Д. Димитров. Электрически машини – част I., С., Техника, 1976 г.