ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 265 1973

ВОПРОСЫ ВЫБОРА РАБОЧЕГО РЕЖИМА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, Ю. Г. МЕЩЕРЯКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Возможности частотного управления позволяют обеспечить работу асинхронного двигателя в наиболее экономичном режиме во всем диапазоне регулирования скорости. В общем случае экономичность рабочего режима определяется соответствующими ему капитальными и текущими затратами. Однако, если считать капитальные затраты не зависящими от режима работы двигателя, то его экономичность будет определяться текущими затратами, включающими в основном затраты на потери энергии в двигателе и стоимость компенсации реактивной энергии. В таком случае для экономичного использования двигателя следует во всем диапазоне регулирования поддерживать оптимальные величины к. п. д. и коэффициента мощности. Общие условия, соответствующие такому режиму, можно найти без привлечения технико-экономических расчетов. Последнее достигается на основании совместного анализа законов частотного регулирования, обеспечивающих в отдельности наименьшие значения реактивной мощности и потерь.

Исследование проводится для асинхронного двигателя с линейной магнитной цепью при допущениях и обозначениях, соответствующих [1].

Потери мощности в двигателе состоят из электрических потерь в обмотках статора и ротора, потерь в стали и механических потерь. Сумма перечисленных потерь выражается формулой:

$$\sum p = r_1 i_1^2 + r_2' i_2'^2 + (k_г + k_в \alpha)\varphi^2 \alpha + k_м \omega^{3/2}. \qquad (1)$$

Здесь i_1, i_2', φ, α, ω соответствуют обозначениям [1], $k_в$ и $k_г$ — коэффициенты потерь на вихревые токи и гистерезис, $k_м$ — коэффициент механических потерь.

После замены в (1) токов, магнитного потока и частоты их значениями [1], потери мощности приводятся к виду, удобному для исследования:

$$\sum p = \left(\nu_1 \beta^2 + \nu_2 \beta + \nu_3 \frac{1}{\beta} + \nu_4\right)\mu, \qquad (2)$$

где

$$\nu_1 = \frac{x_2'^2}{r_2'}(k_г + 2k_в \omega); \quad \nu_2 = 1 + \frac{x_{02}^2 r_1}{r_2' z_0^2} + \frac{x_2'^2}{r_2'}\omega(k_г + k_в \omega);$$

$$\nu_3 = \frac{r_2' r_1}{z_0^2} + r_2'\omega(k_г + k_в \omega); \quad \nu_4 = \frac{2 r_0 r_1}{z_0^2} + r_2'(k_г + 2k_в \omega) + \frac{\omega^{3/2}}{\mu}.$$

Члены $\nu_1 \div \nu_4$ являются функциями скорости вращения.

Функция (2) исследуется на экстремум. Из условия $\frac{\partial \sum p}{\partial \beta} = 0$ находится минимум функции. Ему соответствует уравнение:

$$2 \nu_1 \beta^3 + \nu_2 \beta^2 - \nu_3 = 0 \tag{3}$$

Закон регулирования скольжения, обеспечивающий работу двигателя с минимальными потерями, рассчитывается по следующей формуле, полученной в результате решения уравнения (3):

$$\beta_p = \frac{\nu_2}{6 \nu_1} \left[2 \cos \left(\frac{\pi - \varphi}{3} \right) - 1 \right], \tag{4}$$

где

$$\varphi = \arccos \left(\frac{1}{4 \nu_1} - \frac{\nu_3 \nu_1^2}{2 \nu_2^3} \right).$$

Закон регулирования скольжения, соответствующий работе двигателя с минимальной реактивной мощностью, выражается в соответствии с [1] зависимостями вида:

$$\left.\begin{aligned} \beta_q &= \frac{\omega}{6} \left\{ 2 \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \left(1 - \frac{108 c_2}{c_1 \omega^2} \right) \right] - 1 \right\}; \\ \beta_q &= \sqrt[3]{-\sigma_{1\omega} + \sigma_{2\omega}} + \sqrt[3]{-\sigma_{1\omega} - \sigma_{2\omega}} - \frac{\omega}{6}, \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

где

$$\sigma_{1\omega} = \left(\frac{\omega}{6} \right)^3 - \frac{c_2 \omega}{2 c_1}; \quad \sigma_{2\omega} = \sqrt{\sigma^2_{1\omega} + \left(\frac{\omega}{6} \right)^6}.$$

Графики зависимостей $\beta_p(\omega)$ и $\beta_q(\omega)$, рассчитанные по формулам (4) и (5) для двигателя А051-4 при изменении скорости от номинальной до нуля, приведены на рис. 1.

Оба закона регулирования $\beta_p(\omega)$ и $\beta_q(\omega)$ имеют общую закономерность: скольжение растет с увеличением скорости. Однако интенсивность нарастания скольжения различна: в режиме минимальных потерь скольжение увеличивается почти пропорционально скорости, в то время как для поддержания минимума реактивной мощности требуется в области малых скоростей увеличивать скольжение весьма резко, а по мере дальнейшего разгона двигателя изменять его незначительно.

Абсолютное значение скольжений при минимальных потерях β_p гораздо меньше соответствующих значений, обеспечивающих минимум реактивной мощности β_q. Вследствие этого, между значениями β_p и β_q в рабочем диапазоне скоростей существует широкая зона скольжений, верхнюю границу которой составляют скольжения, соответствующие минимуму реактивной мощности, а нижнюю — скольжения, удовлетворяющие условиям минимума потерь. По мере изменения скольжения в пределах от нижней границы к верхней происходит повышение коэффициента мощности до наибольшего значения и уменьшение к. п. д. от своего максимума. За пределами указанной зоны изменение скольжения в любом направлении сопровождается ухудшением как к. п. д., так и коэффициента мощности. Следовательно, с точки зрения экономичности оптимальные величины скольжения должны находиться в пределах зоны $\beta_p < \beta < \beta_q$.

Знание границ такой зоны имеет практический смысл. В целях облегчения реализации законов регулирования необходимо стремиться к их максимальному упрощению. При этом важно знать, в каких пределах можно допускать отклонение скольжения от расчетной величины, не ухудшая заметно энергетических показателей двигателя. Принятие наиболее удобных для управления приводом законов регулирования с определенным отступлением от условий наиболее экономичной работы двигателя в конечном счете способствует повышению экономичности всего привода за счет сокращения затрат на систему управления.

Для расчета граничных величин скольжений β_p и β_q используются формулы (4) и (5). Формула (4) может быть заменена более простой, аналогичной формуле оптимального скольжения при минимуме потерь, полученной в [2] при условии, что частота является независимой переменной. Исследование уравнения (2) для малых скоростей подтверждает, что для режима минимума потерь допустимо предположение отсутствия влияния скольжения на частоту во всем диапазоне регулирования, так как изменение потерь при изменении частоты сдерживается электрическими потерями в обмотках статора и ротора, которые не зависят от частоты. На основании этого для расчета скольжений, соответствующих минимуму потерь, и для дальнейших исследований достаточно применять формулу, полученную при допущении $\omega \gg \beta$ в результате исследования на минимум функции (2):

$$\beta = \sqrt{\frac{a_3 + r_2'\,\omega(k_г + k_в\,\omega)}{1 + a_1 + a_2\,\omega(k_г + k_в\omega)}}, \tag{6}$$

где

$$a_1 = \frac{(x_0 + x_2')^2 r_1}{r_2' x_0^2}; \quad a_2 = \frac{x_2^{12}}{r_2'}; \quad a_3 = \frac{r_2' r_1}{x_0^2}.$$

Из совместного решения уравнений (5) и (6) находится скорость вращения, при которой условия работы двигателя с минимумом потерь и минимумом реактивной мощности совпадают, то есть двигатель работает с максимальными величинами как к. п. д., так и коэффициента мощности. Такому режиму в рабочем диапазоне скоростей вращения соответствует близкое к нулю значение скорости при скольжении

$$\beta_{э0} = \sqrt{\frac{a_3}{1 + a_1}}. \tag{7}$$

Для всех других скольжений экономичный режим будет характеризоваться определенным (оптимальным) соотношением к. п. д. и коэффициента мощности. С увеличением скорости реактивная мощность вследствие пропорциональности частоте интенсивно возрастает и соответственно увеличивается влияние коэффициента мощности на экономичность двигателя. Оптимальная величина скольжения, обеспечивающая экономичную работу двигателя, смещается от минимума потерь в направлении минимума реактивной мощности. При номинальной скорости вращения оптимальное соотношение между к. п. д. и коэффициентом мощности в двигателях общего применения наблюдается обычно при номинальной или несколько меньшей (на 15—20%) величине скольжения.

В соответствии с изложенным режим работы двигателя можно выбирать, исходя из допущения, что оптимальная зависимость скольжения от скорости $\beta_э(\omega)$ включает в себя два значения скольжения, одно из которых соответствует режиму минимальных потерь при скорости, равной нулю, а другое — соответствует номинальному режиму при номинальной скорости вращения. Простейшей зависимостью, удовлетворяющей этому условию, будет уравнение прямой:

$$\beta_э = \beta_{э0} + (\beta_{эн} - \beta_{э0})\,\omega, \tag{8}$$

где $\beta_{э0}$ определяется по формуле (7), $\beta_{эн} = (08 \div 0{,}9)\,s_н$.

Выражение (8) является приближенным законом экономичного частотного регулирования. С точки зрения удобства реализации достаточно ограничиться данной линейной зависимостью. Погрешность, обусловленная допущением линейности, практически не будет иметь сколько-нибудь существенного значения.

Изменение скольжения в соответствии с (8) предполагает его уменьшение по мере снижения скорости. При управлении по известным законам частотного регулирования (кроме рассмотренного здесь управления по минимуму потерь) скольжение либо не изменяется в зависимости от скорости (режимы с номинальным скольжением, номинальным потоком, минимальным током), либо увеличивается при ее снижении (режим $\frac{u_1}{u_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}\sqrt{\frac{M}{M_н}}$). Вследствие этого, по мере снижения скорости, двигатель используется все более неэкономично.

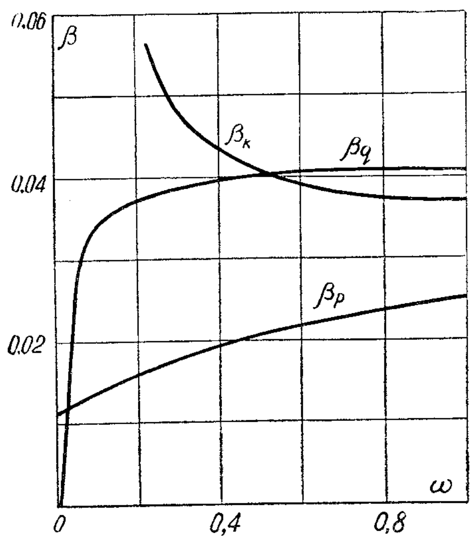

Рис. 1. Зависимости скольжения от скорости, соответствующие минимуму потерь ($\beta_р$), минимуму реактивной мощности (β_q) и режиму $\frac{u_1}{u_{н1}} = \frac{f_1}{f_{1н}}\sqrt{\frac{M}{M_н}}$ ($\beta_к$)

На рис. 1 приведен график изменения скольжения в зависимости от скорости при управлении по основному закону частотного регулирования $\frac{u_1}{u_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}\sqrt{\frac{M}{M_н}}$. Скольжение рассчитано в соответствии с [2] для двигателя А051-4 с номинальным моментом на валу по формуле:

$$\beta_k = \frac{r_2'}{(b^2 + c^2\omega^2)}\left[\left(\frac{m_1 u^2_{1н}\omega^2}{2\omega_{1н} M_н} - r_1\omega\right) - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\left(\frac{m_1 u^2_{1н}\omega^2}{2\omega_{1н} M_н} - r_1\omega\right)^2 - (b^2 + c^2\omega^2)(d^2 + e^2\omega^2)}\right], \qquad (9)$$

где

$$b = r_1\left(1 + \frac{x_2'}{x_0}\right); \quad c = x_1 + x_2' + \frac{x_1 x_2'}{x_0};$$

$$d = \frac{r_1}{x_0}; \quad e = 1 + \frac{x_1}{x_0}.$$

Из рис. 1 хорошо видно, что область работы двигателя с высокими значениями к. п. д. и коэффициента мощности при управлении по закону (9) ограничивается верхней частью диапазона регулирования. При уменьшении скорости скольжение увеличивается, что противоречит не только принципам экономичной работы, но и, как известно, сопровождается снижением перегрузочной способности, излишним выделением тепла в обмотках. Очевидно, наиболее близкий к экономичному режим поддерживается в верхней части диапазона скоростей при управлении по закону $\beta = s_{н} = \text{const}$, а в нижней части — при управлении по минимуму потерь (6).

Выводы

1. Энергетические показатели режима работы двигателя определяются величиной его рабочего скольжения.

2. Оптимальные величины скольжений находятся в зоне между значениями, соответствующими минимуму реактивной мощности и минимуму потерь, причем они ближе к последним в области малых скоростей.

3. Для поддержания экономичного режима при регулировании скорости вниз от номинальной следует уменьшать абсолютное скольжение. Особенно важно это соблюдать в случае работы двигателя на малой скорости вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко, Ю. Г. Мещеряков. Анализ процессов изменения реактивной мощности асинхронного двигателя при регулировании частоты. Настоящий сборник.

2. А. А. Булгаков. Частотное управление асинхронными электродвигателями. Изд. «Наука», 1955.