

УДК 620.91

ОЦЕНКА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В АСИНХРОНОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ПЕРОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Кадушкевич О.В., студент, керівники Дубовик В.Г., старший преподаватель, Лебедев Л.Н., доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Институт энергосбережения и энергоменеджмента

г. Киев

Украина

Однією з тенденцій в області енергозберігаючих технологій останніх років є застосування частотно-регульованих приводів на основі асинхронних електродвигунів короткозамкнених і напівпровідникових перетворювачів частоти, що знижують споживання електричної енергії, що підвищують ступінь автоматизації, зручність експлуатації устаткування і якість технологічних процесів.

Одной из тенденций в области энергосберегающих технологий последних лет является применение частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты, снижающих потребление электрической энергии, повышающих степень автоматизации, удобство эксплуатации оборудования и качество технологических процессов.

One of the trends in energy-saving technologies in recent years is the use of variable speed drives based on asynchronous squirrel-cage motors and semiconductor converters, which reduce electricity consumption, increase the degree of automation, ease of use of equipment and quality processes.

Проблема передачи информации по силовым кабелям изучается около 30 лет в рамках десятков специальных проектов в научно-исследовательских лабораториях по всему миру.

Одной из тенденций в области энергосберегающих технологий последних лет является применение частотно-регулируемых приводов на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей частоты, снижающих потребление электрической энергии, повышающих степень автоматизации, удобство эксплуатации оборудования и качество технологических процессов.

Стандартные асинхронные короткозамкнутые самовентилируемые электродвигатели (АД) наиболее распространены в промышленности. Это обусловлено простотой их конструкции, очень высокой надежностью в эксплуатации, стандартизацией и высоким коэффициентом полезного действия. АД позволяют вносить изменения в конструкцию для удовлетворения специальному применению и различным условиям среды. Фактически они имеют только два недостатка: большой пусковой ток ($5\div 7 I_{ном.}$) и ограниченные возможности регулирования частоты вращения.

Асинхронный двигатель общего применения сконструирован так, что оптимальная плотность электромагнитного потока у него при номинале питающего напряжения 200 В и частоте 50 Гц.

Выходные токи и напряжение преобразователя частоты в отличие от стандартной сети имеют не синусоидальную форму, а пики, высшие гармоники тока и напряжения, быстрое изменение частоты и напряжения во времени. Это приводит к увеличению напряжения на изоляции двигателя, увеличиваются потери двигателя, его вибрация и шум. Так как техническим условием завода-изготовителя не предусматриваются испытания стандартного асинхронного двигателя при питании его от преобразователя частоты, появляется необходимость в проведении дополнительных проверок двигателя. Международным электротехническим комитетом, принят стандарт МЭК 34-17 «Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, питаемые от преобразователей частоты».

При использовании фильтров или дополнительных реактивных сопротивлений для улучшения параметров выходного напряжения и тока преобразователя частоты (приближения их к синусоидальной форме) необходимо обращать внимание на падение величины питающего напряжения двигателя при максимальном токе нагрузки. Падение напряжения должно быть не более 3÷7%. Это обусловлено тем, что максимальный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату величины питающего напряжения. Для устойчивой работы асинхронного двигателя и производственного механизма необходимо определенное сочетание механических характеристик двигателя $M(n)$ и нагрузки $M_c(n)$.

Двигатель устойчиво работает, когда $\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}$ [5].

Момент сопротивления механизма характеризуется начальным статическим моментом при трогании с места и характером изменения момента сопротивления в зависимости от скорости.

В общем виде для большинства вращающихся механизмов момент сопротивления M_c выражается формулой

$$M_c = M_{c,нач} + (M_{c,n} - M_{c,нач}) \cdot \left(\frac{n}{n_H} \right)^P, \quad (4.1)$$

где $M_{c,нач}$ - начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учета момента трения покоя), н·м.; $M_{c,n}$ - номинальный момент сопротивления механизма, н·м; P - показатель степени; n - режимная частота вращения; n_H - номинальная частота вращения, об/мин.

При $P = 0$ момент сопротивления не зависит от частоты вращения, при $P = 2$ момент сопротивления механизма вентиляторного типа изменяется пропорционально квадрату частоты вращения (числу оборотов в минуту).

Так, в ГОСТ 13107-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», коэффициент 25-й гармонической составляющей напряжения сети питания 380 В допускается равным 1,5%. Искажения напряжения, вносимые преобразователем частоты во входящую электрическую цепь, оценивают коэффициентом искажения k_{BX} в процентах, который вычисляют по формуле

$$k_{BX} = \sqrt{k_1^2 - k_0^2}, \quad (6.1)$$

где k_0 - коэффициент искажения синусоидальности кривой на выходе источника электроэнергии; k_1 - коэффициент искажения синусоидальности кривой в процентах, на выходе источника электроэнергии за нормированный интервал времени при включенном преобразователе частоты.

Определение гармонических составляющих выходного напряжения преобразователя частоты с переменной частотой выходного напряжения осуществляют до 15-й гармоники, если другие значения не указаны в ТУ на преобразователь. Требования к максимальным искажениям тока в процентах от максимального тока, потребляемого нагрузкой, приведены

в IEEE 519-1992.

В цепях с несинусоидальными токами, что характерно для электроприводов, управляемых от вентильных преобразователей. При анализе процессов по основной гармонике (гладкой составляющей) без учета высших гармоник можно, как и в традиционном рассмотрении, использовать понятие $\cos\varphi$.

Рассмотрим общие выражения для определения η и k_M , которые будут конкретизированы при анализе различных типов электроприводов.

Используя методы определения активной P , реактивной Q и полной S мощностей в трехфазных цепях переменного тока при управлении от вентильных преобразователей, получим выражения для отыскания η и k_M при синусоидальном напряжении питающей сети. Выражение для k_M выглядит следующим образом:

$$k_M = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2}},$$

где P и S — активная и полная мощности, потребляемые от сети переменного тока трехфазной нагрузкой; Q — реактивная мощность, или мощность сдвига трехфазной нагрузки, обусловленная сдвигом по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно синусоидального напряжения питающей сети; T — мощность искажения, обусловленная наличием в составе несинусоидального периодического тока, кроме основной, высших гармоник; H — мощность несимметрии, учитывающая дополнительные потери энергии, связанные с неравномерной загрузкой фаз трехфазной нагрузки. Большинство применяемых для управления асинхронным двигателем преобразователей обеспечивают симметричную, равномерную загрузку фаз двигателя, поэтому $H=0$.

Значения мощностей S и P в установившемся режиме записываются в следующем

$$S = U_\pi \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2};$$

$$P = \frac{U_\pi}{\sqrt{3}} (I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C}). \quad (2.2)$$

виде [37]:

Тогда

$$k_M = \frac{P}{S} = \frac{I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C}}{\sqrt{3(I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2)}}; \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P} = \frac{\sqrt{3} M_c \omega}{U_\pi (I_{1A1} \cos \varphi_{1A} + I_{1B1} \cos \varphi_{1B} + I_{1C1} \cos \varphi_{1C})}, \quad (2.4)$$

22

где U_π — номинальное действующее линейное напряжение трехфазной сети; I_{1A}, I_{1B}, I_{1C} — действующие значения токов фазы соответственно A, B, C статора; $I_{1A1}, I_{1B1}, I_{1C1}$ — действующие значения первой гармоники токов фаз A, B, C статора; $\varphi_{1A}, \varphi_{1B}, \varphi_{1C}$ — фазный сдвиг первой

гармоники стартового тока фаз A, B, C по отношению к напряжению фазы A, B, C питающей сети; $P_{\text{мех}}$ — механическая мощность на валу асинхронного двигателя, $P_{\text{мех}} = M_c \omega$.

Статорные токи отдельных фаз двигателя, как правило, симметричны. В этом

случае $I_{1A} = I_{1B} = I_{1C} = I_1; \varphi_{1A} = \varphi_{1B} = \varphi_{1C} = \varphi_1; I_{1A1} = I_{1B1} = I_{1C1} = I_{11}$, где I_1 — действующий ток фазы статора; I_{11} — действующий ток первой гармоники фазы статора. Тогда

$$k_u = I_{11} / I_1 \quad \text{коэффициент искажения.}$$

Для оценки нагрева обмоток двигателя высшими гармониками и определения возрастания потерь при полигармонических токах по сравнению с синусоидальными введем коэффициенты перегрузки по токам статора k_{n1} и ротора k_{n2} . При симметричных режимах значения k_n для отдельных фаз статора и ротора одинаковы:

$$\begin{aligned} k_{n1} &= I_1 / I_{11}; \\ k_{n2} &= I_2 / I_{21}, \end{aligned}$$

где I_2 — действующий ток фазы ротора; I_{21} — действующее значение первой (основной) гармоники тока ротора.

В качестве показателя экономичности работы электропривода в переходных режимах используем значение энергии потерь за время переходного процесса $\Delta W_{п.п.}$. Очевидно, в общем случае

$$\Delta W_{п.п.} = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta P_{дв} dt,$$

где $t_{п.п.}$ — время переходного процесса; $\Delta P_{дв}$ — суммарная мощность потерь в двигателе:

$$\Delta P_{дв} = \Delta P_{1м} + \Delta P_{2м} + \Delta P_{1с} + \Delta P_{2с} + \Delta P_{доп} + \Delta P_{мех}, \quad (2.9)$$

23

где $\Delta P_{1м}$, $\Delta P_{2м}$ — потери в меди соответственно статора, ротора асинхронного двигателя (для асинхронных двигателей с фазовым ротором вместо $\Delta P_{2м}$ используется величина $\Delta P_{2м\sigma}$ — полные потери в роторной цепи двигателя); $\Delta P_{1с}$, $\Delta P_{2с}$ — потери в стали соответственно статора, ротора; $\Delta P_{доп}$ — дополнительные потери;

$\Delta P_{мех}$ — механические потери. В зависимости от типа анализируемого асинхронного электропривода отдельные составляющие потерь в формуле (2.9) могут быть незначительными в общем балансе потерь ($\Delta P_{дв}$) и их можно не учитывать при определении $\Delta W_{п.п.}$. В ряде случаев потери в полупроводниковом преобразователе $\Delta P_{пр}$, от которого питается асинхронный двигатель, могут оказаться существенными и потребуются их учет при определении $\Delta W_{п.п.}$, т. е.

$$\Delta W_{п.п.} = \int_0^{t_{п.п.}} (\Delta P_{дв} + \Delta P_{пр}) dt = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta P_{эп} dt,$$

где $\Delta P_{пр}$ — потери в преобразователе; $\Delta P_{эп}$ — потери в электроприводе, $\Delta P_{эп} = \Delta P_{дв} + \Delta P_{пр}$.

Эти вопросы будут конкретизированы при рассмотрении разных типов электроприводов.

Еще один аспект, требующий рассмотрения, — это особенности математического описания и модели полупроводниковых преобразователей, которые используются для регулирования асинхронного двигателя, и систем управления ими.

Мощность потерь энергии в асинхронном двигателе. Анализ потерь энергии в различных режимах электропривода важен как с точки зрения анализа экономичности работы системы, так и для оценки теплового состояния двигателя при выборе или проверки его по условию нагрева.

При частотном способе регулирования скорости определяющими для

асинхронного двигателя являются следующие виды потерь:

потери в меди обмотки статора ($\Delta P_{1М}$) и обмотки ротора ($\Delta P_{2М}$), обусловленные первыми гармониками токов обмоток;

потери в стали статора от гистерезиса ($\Delta P_{1с.г}$) и вихревых токов ($\Delta P_{1с.в}$);

механические потери ($\Delta P_{мех}$);

добавочные потери ($\Delta P_{доб}$), пропорциональные квадрату основной гармоники тока статора.

Потери в меди обмотки статора $\Delta P_{1М}$ и ротора $\Delta P_{2М}$ пропорциональны квадратам их токов. В системе единиц физических величин формулы для расчета потерь в обмотках запишем в следующем виде:

где i_1, i_2 — модули результирующих векторов токов обмоток статора и

$$\Delta P_{1М} = \Delta P_{1М.НОМ} \frac{i_1^2}{i_{1НОМ}^2}; \quad (2.36)$$

$$\Delta P_{2М} = \Delta P_{2М.НОМ} \frac{i_2^2}{i_{2НОМ}^2}, \quad (2.37)$$

ротора, $i_1 = (i_{1u}^2 + i_{1v}^2)^{1/2}, i_2 = (i_{2u}^2 + i_{2v}^2)^{1/2}; i_{1НОМ}, i_{2НОМ}$

значения модулей результирующих векторов токов статора и ротора в номинальном режиме.

Потери в стали статора на гистерезис $\Delta P_{1с.г}$ и вихревые токи $\Delta P_{1с.в}$ зависят от частоты и потока двигателя:

$$\Delta P_{1с.г} = \Delta P_{1с.г.НОМ} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0НОМ}^2} \frac{\omega_1}{\omega_{1НОМ}}; \quad (2.38)$$

$$\Delta P_{1с.в} = \Delta P_{1с.в.НОМ} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0НОМ}^2} \frac{\omega_1^2}{\omega_{1НОМ}^2}, \quad (2.39)$$

где $\Delta P_{1с.г.НОМ}, \Delta P_{1с.в.НОМ}$ — потери в стали статора на гистерезис и вихревые токи в номинальном режиме; ψ_0 — модуль результирующего вектора главных потокосцеплений, $\psi_0 = (\psi_{0u}^2 + \psi_{0v}^2)^{1/2}; \omega_1$

угловая частота напряжения статора; $\psi_{0НОМ}$ и $\omega_{1НОМ}$ — значения модуля результирующего вектора главных потокосцеплений и угловой частоты напряжения статора в номинальном режиме.

44

где $\Delta P_{мех.НОМ}$ — механические потери при номинальной скорости вращения двигателя; $\omega_{НОМ}$ — номинальная скорость вращения двигателя.

Добавочные потери $\Delta P_{доб}$, пропорциональные квадрату тока обмотки статора, определяются по формуле

$$\Delta P_{доб} = \Delta P_{доб.НОМ} \frac{i_1^2}{i_{1НОМ}^2}, \quad (2.41)$$

где $\Delta P_{доб.НОМ}$ — добавочные потери двигателя при работе в номинальном режиме.

Суммарная мощность потерь энергии в асинхронном двигателе при частотном способе регулирования его скорости определяется по формуле

$$\Delta P_{дв} = \Delta P_{1М} + \Delta P_{2М} + \Delta P_{1с.г} + \Delta P_{1с.в} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}. \quad (2.42)$$

Как следует из формул (2.36)... (2.41), каждая из составляющих суммарных потерь (2.42) зависит от режима работы асинхронного двигателя.

АД в переходных режимах электропривода, например при пуске двигателя, при переходе от одной скорости к другой и торможении.

В общем случае потери энергии во время переходного процесса представляют собой мгновенную мощность суммарных потерь в элементах преобразователя частоты и асинхронном двигателе: электрических, магнитных, механических и добавочных. Однако полный учет суммарных потерь в переходном процессе даже на уровне тех оценок, которые были приняты для установившегося режима, не представляется возможным, что объясняется следующими причинами.

Аналитическое определение суммарных потерь в ПЧ и АД при их работе в динамических режимах, сопровождающихся электромагнитными переходными процессами в преобразователе и двигателе, представляет собой сложную задачу. Приведенные общие уравнения динамики системы ПЧ—АД учитывают только потери энергии в меди обмоток реакторов ПЧ и потери энергии в меди обмоток статора и ротора АД. Формулы электрических потерь в вентилях выпрямителя и полупроводниковых ключах автономного инвертора напряжения, а также формулы магнитных, механических и добавочных потерь в двигателе приемлемы для установившихся режимов работы привода. Использование их для расчета мгновенных суммарных потерь энергии в переходных режимах требует дополнительного обоснования. Превалирующими в общей сумме потерь в переходных режимах при средних и больших нагрузках являются мгновенные электрические потери в двигателе:

$$\Delta p_{1м}(t) = \Delta P_{1м.ном} \frac{i_1^2(t)}{i_{1ном}^2}; \quad (2.63)$$

$$\Delta p_{2м}(t) = \Delta P_{2м.ном} \frac{i_2^2(t)}{i_{1ном}^2}. \quad (2.64)$$

К электрическим потерям в двигателе прибавляются электрические потери в реакторном оборудовании силовой части электропривода:

$$\Delta p_{р.вх}(t) = \Delta P_{р.вх.ном} \frac{p_1^2(t)}{P_{1ном}^2}; \quad \Delta p_{р.ф}(t) = \Delta P_{р.ф.ном} \frac{p_1^2(t)}{P_{1ном}^2}; \quad \Delta p_{р.вых}(t) = \Delta P_{р.вых.ном} \frac{i_1^2(t)}{i_{1ном}^2}.$$

При реостатном регулировании скорости потери в роторных цепях электропривода линейно связаны со скольжением, что приводит к низким энергетическим показателям системы. Перераспределение потерь между сопротивлениями ротора двигателя и добавочными сопротивлениями происходит таким образом, что при снижении скорости потери в АД не превышают номинального значения, поэтому, если не учитывать ухудшение теплоотдачи самовентилируемых двигателей, нет необходимости увеличивать установленную мощность двигателя для предотвращения его перегрева.

Выводы. Точную картину процессов в асинхронном электроприводе с учетом гармонического состава токов, питающих двигатель, оценку энергетических показателей, учет влияния полупроводниковых электроприводов на питающую сеть можно получить, анализируя совместную работу системы «преобразователь — двигатель» с использованием взаимосвязанного математического описания указанных элементов системы.

Література

1. G. Goldberg. “EMC PROBLEMS OF POWER LINE COMMUNICATION (PLC) SYSTEMS”. 2001

2. Сулейманов А.О., Гольдштейн Е.И., «Определение неактивной мощности и ее составляющих по массивам мгновенных значений токов и напряжений», Томский политехнический университет. Томск. -2006.-С.89-100.
3. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей - М.: Энергия, 1978. -320с.
4. Дубовик В.Г., Лебедев Л.Н., Перевозник Е.П. Установка для дослідження енергетичних режимів системи ПЧ-АД. Деп. у ДНТБ України 18.05.2009 р., № 22 – Ук. 2009.
5. Войтех А.А., Оноприч В.П., Оноприч Л.В. Асинхронні двигуни загальнопромислової серії при частотному регулюванні швидкості обертання //Техн. електродинаміка . -2004.- №4.- С.41-45.
6. Дубовик В.Г., Лебедев Л.Н., Перевозник Е.П. Дослідження енергетичних режимів системи ПЧ-АД з урахуванням неактивної потужності. Деп. в ДНТБ України 14.04.09, №19-Ук2009
7. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. Автономные преобразователи.- Издательство МЭИ, 2003. - 64 с.
8. Хашимов А.А., Специальные режимы частотно-управляемых асинхронных электроприводов. - М.: Энергоатомиздат, 1994.- 254 с.
9. Радимов С.Н. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод // Одесский национальный политехнический университет. - 2007.-№1.-С.25-30.
10. Сулейманов А.О. Реактивная мощность в несинусоидальных режимах однофазной цепи // Современные техника и технологии: Труды 8-й Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.- Томск: Изд-во ТПУ. 2002. -Т. 1. - С. 62–63.