

личины параметров внутренней структуры привода изменять режим работы, обеспечивая постоянство реализуемых динамических параметров.

Экспериментальная проверка адаптивных параметров дебалансного привода с существенно нелинейными связями, выполненная на виброударной площадке для формовки железобетонных изделий, показала, что при изменении величины технологической нагрузки от 30 кН до 60 кН потребляемая приводом мощность возросла в 2,2 раза, а величина ускорения – в 1,9 раза, что позволило обеспечить рациональные параметры нагружения широкой номенклатуры изделий, снижая энергоемкость процесса формовки и повышая качество готовых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косолапов А.Н. Адаптивное свойство колебательной системы с самосинхронизирующимися вибровозбудителями // ДАН СССР, 1989. Т. 309, № 2. – С. 293-296.
2. А.с. 18834799 В28В1/08. Виброударная площадка для формовки железобетонных изделий. Потураев В.Н. и др. Опубл. 15.08.93. Бюл. № 30.
3. Остапенко В.А. Механические виброударные системы. – К.: Наукова думка. – 1966. – 240 с.

УДК [621.51:622.532]-83

С.В. Дзюба

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕГУЛИРУЕМОЙ ТУРБОУСТАНОВКИ

Запропонована математична модель синхронного електропривода керуємої турбоустановки з обмеженнями на вироблення необхідної частини реактивної потужності і можливістю втрати двигуном синхронізму.

Одной из главных задач, стоящих перед горно-обогатительными предприятиями, является снижение себестоимости продукции. Сегодня значительную часть себестоимости продукции на этих предприятиях составляет оплата за электроэнергию, стоимость которой зависит от режима работы основного оборудования, а также от величины потерь активной и реактивной мощности. Работа оборудования в неноминальных, нестабильных режимах приводит к завышенному потреблению электроэнергии. Сегодня поставщики электроэнергии устанавливают оптимальный уровень потребления реактивной мощности из сети энергосистемы. Остальную часть реактивной мощности потребитель должен покрывать своими средствами. В случае отсутствия собственных источников реактивной мощности или недостаточной их мощности потребитель оплачивает дополнительно потребляемую реактивную мощность из сети энергосистемы. Такая оплата устанавливается в виде скидок и надбавок к тарифу за электроэнергию, зависящих от степени соответствия оптимального значения заданного энергосистемой и фактически потребляемой мощности.

Таким образом, одними из возможных путей снижения себестоимости продукции являются регулирование режимов работы оборудования и компенсация реактивной мощности.

Так как на всех обогатительных фабриках эксплуатируются турбомашини, потребляющие электроэнергию, режим работы которых подвержен значительным колебаниям в результате изменения большого числа факторов. При этом основными источниками реактивной мощности являются конденсаторные батареи и синхронные двигатели. Таким образом, наиболее выгодным является использова-

ние синхронного электродвигателя, как электропривод турбоустановки и одновременно с этим как источник недостающей части реактивной мощности. Для успешной реализации этой задачи необходимо научное обоснование параметров и режимов работы синхронного двигателя в предполагаемых условиях. Это требует создания математической модели рассматриваемого объекта.

В статье предлагается математическая модель синхронного электродвигателя, регулирующего работу турбомашин и одновременно используемого для генерации реактивной мощности.

Уравнение движения для синхронного двигателя запишется [1]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{син}} + M_a - M, \quad (1)$$

где $M_{\text{син}}$ - синхронный момент явнополюсного двигателя; M_a - асинхронный момент, создаваемый пусковой клеткой двигателя; M - момент нагрузки на валу двигателя; J - массовый момент инерции вращающихся частей; ω - угловая скорость двигателя; t - время.

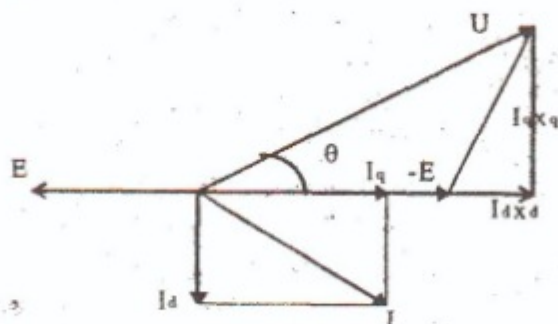
Используя упрощенную векторную диаграмму напряжений синхронного двигателя, приведенную на рис. 1 определим моменты двигателя входящие в уравнение (1), [2]. Синхронный момент в уравнении (1) запишется

$$M_{\text{син}} = M_{\text{син.а}} \sin(\theta) + M_{\text{р.а}} \sin(2\theta), \quad (2)$$

где $M_{\text{син.а}}$ - амплитудное значение синхронного момента; $M_{\text{р.а}}$ - амплитудное значение реактивного момента двигателя с явно выраженными полюсами, которые определяются следующими зависимостями:

$$M_{\text{син.а}} = (mUE) / (\omega_o x_d), \quad M_{\text{р.а}} = (mU^2(x_d - x_q)) / (2x_d x_q \omega_o),$$

где m - число фаз; ω_o - синхронная угловая скорость. Для двигателя с неявно выраженными полюсами $x_d \approx x_q$ и $M_{\text{р.а}} = 0$.



E - индуцированная эдс; U - напряжение сети; I - ток сети; I_d и I_q - составляющие тока по продольной и поперечной осям; x_d и x_q - синхронное индуктивное сопротивление по продольной и поперечной осям.

Рис. 1 - Векторная диаграмма синхронного двигателя

При изменении режима работы турбоустановки в синхронном двигателе появляется асинхронный момент, обусловленный наличием скольжения ротора относительно вращающегося потока статора. В общем случае этот момент определяется из выражения

$$M_a = cs; \quad (3)$$

$$c = M_{ном} / s_{ном}$$

где c - коэффициент, характеризующий наклон механической характеристики двигателя в асинхронном режиме; s - скольжение. Обычно коэффициент c определяют, исходя из данных входного режима при $s = 0,05$:

$$c = M_{ax} / 0,05. \quad (4)$$

Так как разность скоростей ротора и поля статора представляет собой скорость изменения во времени угла θ , выраженного в механических градусах, то, следовательно:

$$s = \frac{1}{\omega_o} \frac{d\alpha}{dt}; \quad \alpha = \theta/p, \quad (5)$$

где p - количество пар полюсов.

Таким образом, с учетом формул (4),(5) получаем окончательное выражение для M_a .

$$M_a = c \frac{1}{\omega_o} \frac{d\alpha}{dt} = c \frac{1}{p\omega_o} \frac{d\theta}{dt} \text{ или } M_a = D \frac{d\alpha}{dt} = D' \frac{d\theta}{dt}, \quad (6)$$

где $D = \frac{c}{\omega_o}$; $D' = \frac{c}{p\omega_o}$. Параметр D определяется исходя из величины входного момента

$$D = \frac{c}{\omega_o} = \frac{M_{ном}}{\omega_o s_{ном}} = \frac{M_{ax}}{0,05\omega_o}.$$

Момент нагрузки на валу синхронного двигателя M_c , используемого как электропривод турбомашин, рассчитывается по формуле.

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\omega \eta}, \quad (7)$$

где ρ - плотность перемещаемой среды; g - ускорение свободного падения; Q - расход; H - напор; η - КПД турбоустановки.

При работе турбомашин на сеть без противодействия $H_{ст}=0$, характеристика сети определяется уравнением [3]

$$H = RQ^2, \quad (8)$$

где R - коэффициент сопротивление сети.

Реальная характеристика в этом случае описывается трехчленом второй степени

$$H = A\omega + B\omega Q + CQ^2, \quad (9)$$

где A, B, C - параметры магистрали.

Решая совместно уравнения (8) и (9), получаем зависимости для Q и H от скорости вращения ω

$$Q = k_Q \omega \text{ и } H = k_H \omega^2, \quad (10)$$

$$\text{где } k_Q = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(C - R)}}{2(C - R)}; \quad k_H = \left[\frac{-B/\sqrt{R} + \sqrt{B^2/R + 4A(C/R)}}{2(C/R - 1)} \right]^2$$

Таким образом, расход прямо пропорционален скорости вращения, а напор прямо пропорционален квадрату скорости вращения.

С учетом того, что $\omega = \omega_o - \frac{d\alpha}{dt}$, а $s = \frac{1}{\omega_o} \frac{d\alpha}{dt}$, то угловая частота вращения ротора будет

$$\omega = \omega_o - \frac{d\alpha}{dt}. \quad (11)$$

При подстановке полученной формулы для ω из (11) в зависимость (10) для расхода и напора запишем следующие выражения:

$$Q = k_Q \left(\omega_o - \frac{d\alpha}{dt} \right) \text{ и } H = k_H \left(\omega_o - \frac{d\alpha}{dt} \right)^2.$$

Подставляя значение ω из (11) в (7), получается окончательное выражение для момента нагрузки

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\left(\omega_o - \frac{d\alpha}{dt} \right) \eta}. \quad (12)$$

Учитывая выражение (11), производная по времени от угловой скорости ω запишется так:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad (13)$$

Подставляя в уравнение (1) выражения (2), (6), (12), (13), и учитывая что $\theta = p\alpha$, получаем дифференциальное уравнение, описывающее движение синхронного двигателя:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + M_{\text{син.а}} \sin(p\alpha) + M_{p.a} \sin(2p\alpha) - \frac{pgQH}{\left(\omega_o - \frac{d\alpha}{dt}\right)\eta} = 0 \quad (14)$$

Синхронный двигатель позволяет регулировать потребление реактивной мощности. При перевозбуждении синхронный двигатель будет потреблять размагничивающий ток, опережающий по фазе напряжение на угол 90° , т.е. будет работать генератором реактивной энергии [1]. Согласно [4] величина реактивной мощности, потребляемая двигателем определяется формулой:

$$Q_1 = \frac{M_{\text{эм}}\omega}{\eta} \text{tg}\varphi_{\text{сд}}; \quad M_{\text{эм}} = M_{\text{син.а}} + M_{p.a} + M_a, \quad (15)$$

где $M_{\text{эм}}$ - электромагнитный момент синхронного двигателя; η - КПД двигателя; $\text{tg}\varphi_{\text{сд}}$ - коэффициент синхронного двигателя по реактивной мощности.

Подставляя значения $M_{\text{син.а}}$, $M_{p.a}$, M_a и ω в выражение (15) получается формула для нахождения минимально необходимого значения реактивной мощности Q_1

$$Q_1 = \frac{1 - \frac{1}{\omega_o} \frac{d\alpha}{dt}}{\eta} \left[M_{\text{син.а}} \sin(p\alpha) + M_{p.a} \sin(2p\alpha) + d \frac{d\alpha}{dt} \right] \text{tg}\varphi_{\text{сд}} \quad (16)$$

В процессе работы все синхронные двигатели должны вырабатывать реактивную мощность не меньшую чем суммарная реактивная нагрузка всех потребителей данного предприятия. Таким образом, для каждого синхронного двигателя должно выполняться условие:

$$Q_1 \geq \frac{Q_*}{n} \quad \text{или} \quad \frac{1 - \frac{1}{\omega_o} \frac{d\alpha}{dt}}{\eta} \left[M_{\text{син.а}} \sin(p\alpha) + M_{p.a} \sin(2p\alpha) + D \frac{d\alpha}{dt} \right] \text{tg}\varphi_{\text{сд}} \geq \frac{Q_*}{n}, \quad (17)$$

где Q_* - суммарная реактивная нагрузка всех потребителей; n - количество синхронных двигателей, используемых для компенсации реактивной мощности.

В рассматриваемом случае на работу синхронного электродвигателя накладываются следующие ограничения. Первое ограничение заключается в необходимости

сти генерировать необходимую реактивную мощность. Другое ограничение связано с возможностью потери двигателем синхронизма. Существует граничное значение скольжения s , начиная с которого двигатель втягивается в синхронизм практически при любом значении угла θ [1] :

$$s < 0,0564 \sqrt{\frac{\omega_o M_m}{J}}, \quad (18)$$

где M_m - максимальное значение момента синхронного двигателя.

Условие (18) накладывает ограничения на скорость изменения величины α :

$$\frac{d\alpha}{dt} < 0,0564 \sqrt{\frac{\omega_o M_m}{J}}. \quad (19)$$

Невыполнение условия (19) приводит к недопустимым в процессе эксплуатации явлениям: к потере электродвигателем устойчивости, к колебаниям ротора, выпадения из синхронизма и т.д.

Таким образом, решение уравнения (14) с ограничениями (17) и (19) позволяет определить режим работы синхронного электродвигателя при переменной нагрузке, как с точки зрения компенсации реактивной мощности так и с точки зрения привода турбомашин. На основании построенной математической модели становится возможным оценить взаимозависимость величины компенсируемой реактивной мощности и неустойчивости параметров магистрали. Это позволяет разработать рациональную стратегию снижения себестоимости продукции горнообогатительных предприятий за счет эксплуатации оборудования в номинальных режимах и компенсации реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинявский. - М. : Энергия, 1974.-568с.
2. Андреев В.П., Сабиллин Ю.А. основы электропривода. - М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963.-772с.
3. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. - М. ; Энергия, 1972. - 240с.
4. Вербовой П.Ф. перспективы создания регулируемого электропривода переменного тока для турбомеханизмов // Проблемы энергосбережения. - К. : Наукова думка, 1993. - Вып. 11. - С.3-11.

УДК 622.765:622.751.77

А.С. Кирнарский, В.В. Гаевой

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ПУЛЬПЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ МОКРОЙ ВИНТОВОЙ СЕПАРАЦИИ

Наведено результати стемдових досліджень впливу щільності пульпи на показники мокрої гвинтової сепарації.

Аутогенные свойства разделительной среды могут проявиться только при определенном содержании твердой фазы в исходной пульпе, так как повышение плотности пульпы сопровождается усилением циркуляции зерен промежуточной фрак-