

постоянного напряжения» DC/DC (корректор коэффициента мощности – ККМ), формирующего выходное трёхфазное напряжение переменного тока промышленной частоты.

Библиографический список

1. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Сверхскоростные и сверхбыстрые синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (обзор зарубежных публикаций) // Электричество. 2014. № 3.

Сведения об авторах

Хитров Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» Псковского государственного университета, e-mail: khitrov-pscov@mail.ru.

Хитров Андрей Александрович, инженер кафедры «Электропривод и системы автоматизации» Псковского государственного университета, e-mail: khitrov.aa@gmail.com.

2. Хитров А.И., Федотов И.М., Хитров А.А. Экспериментальный стенд для исследования режимов работы асинхронных и вентильных двигателей современных электроприводов. Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 3. ч.4, 2010. 262 с.

3. Хитров А.И., Хитров А.А. Система управления электрической частью автономной когенерационной установки малой мощности с использованием твердотельных реле. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014 – 244 с.

УДК 62-83

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ПОТОКЕ

Р.Т. ШРЕЙНЕР, д-р техн.наук, В.Н. ПОЛЯКОВ, д-р техн.наук, А.В.МЕДВЕДЕВ, аспирант

Рассматриваются вопросы повышения энергетической эффективности синхронного электропривода при двухзонном частотном регулировании скорости. Излагаются подходы к реализации режимов работы синхронного двигателя в верхней и нижней зонах регулирования. Предложена структура формирователя режимов, повышающего энергетическую эффективность электропривода в нижней зоне. Приводится сравнительная характеристика энергетической эффективности электропривода в динамике.

Ключевые слова: синхронный электропривод, двухзонное регулирование, энергетическая эффективность.

VARIABLE-SPEED SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VARYING FLUX ENERGY EFFICIENCY

R.T. SHREINER, Doctor of Engineering, V.N. POLYAKOV, Doctor of Engineering, A.V. Medvedev, graduate student.

Issues of improving energy efficiency of synchronous electric drive at two-band frequency speed regulation are considered. Approaches to implementing different operating modes of synchronous motor in the upper and lower regulation zones are presented. The structure of a mode shaper improving energy efficiency of the drive in the lower zone is proposed. Comparative analysis of energy efficiency of the electric drive in dynamics is provided.

Keywords: synchronous electric drive, two-band regulation, energy efficiency.

Введение. Одной из актуальных и сложных задач в области электропривода переменного тока является повышение энергетической эффективности синхронных электроприводов при двухзонном регулировании скорости. Традиционное ее решение для синхронного двигателя (СД) состоит в обеспечении в верхней зоне режима постоянства ЭДС якоря ($e_s = e_{s,TP}$), а в нижней зоне – режима постоянства модуля вектора потокосцеплений якоря ($\psi_s = \psi_s^*$) [1,2]. Соблюдение дополнительного условия – ортогональности векторов потокосцеплений и токов якоря обеспечивает единичный коэффициент мощности, т.е. ($q_s = 0$) по цепи якоря, что

отвечает требованию оптимального использования габаритной мощности двигателя и преобразователя частоты. В [2] показано, что с позиций снижения суммарных потерь в двигателе и преобразователе частоты, а также в целях рационального перераспределения электрических потерь между обмотками возбуждения и якоря СД, в нижней зоне вместо режима $\psi_s = \psi_s^*$ целесообразнее использовать режим либо минимума потерь при переменном потоке, либо постоянства модуля вектора главных потокосцеплений ($\psi_m = \psi_m^*$) при соблюдении ортогональности векторов главных потокосцеплений и токов якоря. В этих случаях

где $\mathbf{U}_s^{Gr} = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$, $\mathbf{I}_s^{Gr} = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$,

$\mathbf{\Psi}_s^{Gr} = [\psi_{sd} \ \psi_{sq}]^T$ – векторы напряжений, токов

и потокосцеплений обмотки якоря;

$\mathbf{U}_f^{Gr} = [u_{fd} \ 0]^T$, $\mathbf{I}_f^{Gr} = [i_{fd} \ 0]^T$, $\mathbf{\Psi}_f^{Gr} = [\psi_{fd} \ 0]^T$ –

векторы напряжений, токов и потокосцеплений обмотки возбуждения;

$\mathbf{U}_m^{Gr} = [\psi_{md} \ \psi_{mq}]^T$, $\mathbf{I}_m^{Gr} = [i_{md} \ i_{mq}]^T$ – векторы

главных потокосцеплений и результирующих намагничивающих токов; Γ – символ транспонирования.

Матрицы активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния обмоток

$$\mathbf{R}_s^{Gr} = \text{diag} [r_s \ r_s]; \quad \mathbf{L}_{s\sigma}^{Gr} = \text{diag} [l_{s\sigma} \ l_{s\sigma}];$$

$$\mathbf{R}_f^{Gr} = \text{diag} [r_{fd} \ 0]; \quad \mathbf{L}_{f\sigma}^{Gr} = \text{diag} [l_{fd\sigma} \ 0].$$

Матричный коэффициент $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Насыщение главной магнитной цепи машины учитывается нелинейным оператором \mathbf{F}_m , связывающим вектор главных потокосцеплений $\mathbf{\Psi}_m$ с вектором результирующих намагничивающих токов \mathbf{I}_m . В системе уравнений (1) варьируемыми независимыми величинами являются составляющая вектора главных потокосцеплений ψ_{md} и ток возбуждения i_{fd} в системе координат, вращающейся с угловой скоростью индуктора.

Энергетическая модель включает следующие показатели:

$$u_s^2 = \mathbf{U}_s^{Gr} \bullet \mathbf{U}_s^{Gr}; \quad u_f^2 = \mathbf{U}_f^{Gr} \bullet \mathbf{U}_f^{Gr};$$

$$i_s^2 = \mathbf{I}_s^{Gr} \bullet \mathbf{I}_s^{Gr}; \quad i_f^2 = \mathbf{I}_f^{Gr} \bullet \mathbf{I}_f^{Gr};$$

$$\psi_s^2 = \mathbf{\Psi}_s^{Gr} \bullet \mathbf{\Psi}_s^{Gr}; \quad \psi_f^2 = \mathbf{\Psi}_f^{Gr} \bullet \mathbf{\Psi}_f^{Gr};$$

$$\psi_m^2 = \mathbf{\Psi}_m^{Gr} \bullet \mathbf{\Psi}_m^{Gr}; \quad i_m^2 = \mathbf{I}_m^{Gr} \bullet \mathbf{I}_m^{Gr};$$

$$q_s = \text{sign}(\omega_s) \mathbf{U}_s^{Gr} \bullet \mathbf{B} \mathbf{I}_s^{Gr}.$$

Все переменные и параметры оптимизационной модели представлены в относительных единицах [3].

При оптимизации режимов СД по минимуму суммарных потерь используется целевая функция:

$$\Delta p = (k_s + k_{\text{доб}}) i_s^2 + k_{fd} i_{fd}^2 + k_{\text{магн}} \omega_s^n \psi_m^2 + k_{\text{мех}} \omega^m,$$

где k_i , n , m – постоянные коэффициенты.

Постановка задачи оптимизации формулируется следующим образом:

$$\Delta p(\psi_{md}, i_{fd}, \mathbf{X}) \rightarrow \min_{(\psi_{md}, i_{fd})}.$$

(2)

Для поиска управляющих воздействий, обеспечивающих режим работы СД при постоянстве $e_s = e_{s, \text{гр}}$, конструируется целевая функция вида

$$J = a_1 q_s^2 + a_2 (\psi_s^* - \psi_s)^2,$$

где a_1 , a_2 – постоянные коэффициенты; ψ_s^* – заданное значение потокосцепления обмотки якоря при фиксированном значении скорости. При значении $J=0$ обеспечивается режим работы СД при постоянстве $e_s = e_{s, \text{гр}}$ с отсутствием потребления реактивной мощности (q_s) двигателем.

Поиск управлений в этом случае сводится к решению экстремальной задачи

$$J(\psi_{md}, i_{fd}, \mathbf{X}) \rightarrow 0_{(\psi_{md}, i_{fd})}.$$

(3)

Решения задач (2) и (3) (законы управления) определяются в виде зависимостей ψ_{md} и i_{fd} от m и ω . На рис. 4 представлены зависимости $\psi_{md}(m, \omega)$ и $i_{fd}(m, \omega)$ при фиксированных значениях скорости $\omega = \omega_{\text{ном}}$ и $\omega = 2\omega_{\text{ном}}$. Как видно, $\psi_{md}(m, \omega)$ и $i_{fd}(m, \omega)$ имеют нелинейный характер. Графики функций симметричны относительно оси ординат и положительны. Вместе с тем, характер поведения их существенно различается. В режиме идеального холостого хода при минимизации потерь $\psi_{md} = 0$ и $i_{fd} = 0$ и монотонно возрастают с увеличением m . В то же время при управлении с постоянством ЭДС якоря $\psi_{md} \neq 0$ и $i_{fd} \neq 0$. С увеличением m составляющая ψ_{md} в области рабочих нагрузок уменьшается.

Динамика электропривода. На рис. 5 приведены результаты математического моделирования динамических режимов синхронного электропривода при двухзонном регулировании скорости с традиционными режимами и при реализации в нижней зоне режима минимума суммарных потерь СД. Регуляторы системы управления имеют параметры, соответствующие настройкам контуров на модульный оптимум.

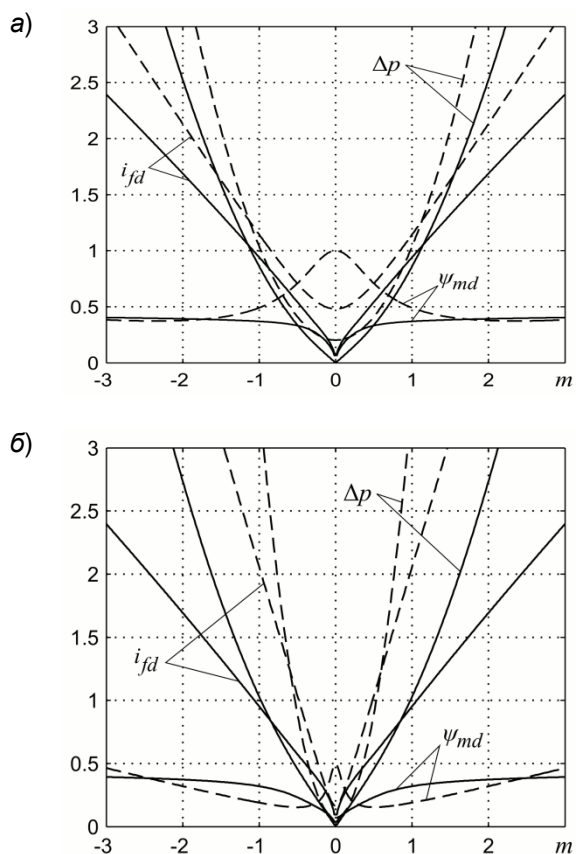


Рис. 4. Характеристики СД при $\psi = \psi_s^*$ (штриховые линии) и минимуме потерь (сплошные линии):
 а) $\omega = \omega_{НОМ}$; б) $\omega = 2\omega_{НОМ}$

Как видно, процессы регулирования момента (m) и скорости (ω) на всех этапах времени инвариантны к различию реализуемых режимов комбинированного управления. В то же время, законы изменения во времени напряжений, токов, потокоцеплений и потерь оказываются различными. В частности, в режиме $\psi = \psi_s^*$ необходим этап предварительного задания потока, на котором фильтр НФ обеспечивает плавное нарастание модуля вектора главных потокоцеплений (ψ_m) до значения ψ_m , соответствующего моменту $m=0$ и скорости $\omega=0$. В режиме управления по минимуму потерь при переменном потоке предварительного намагничивания СД не требуется. Отсюда следует различие тепловых режимов двигателя во время пауз (остановок двигателя по условиям технологического процесса).

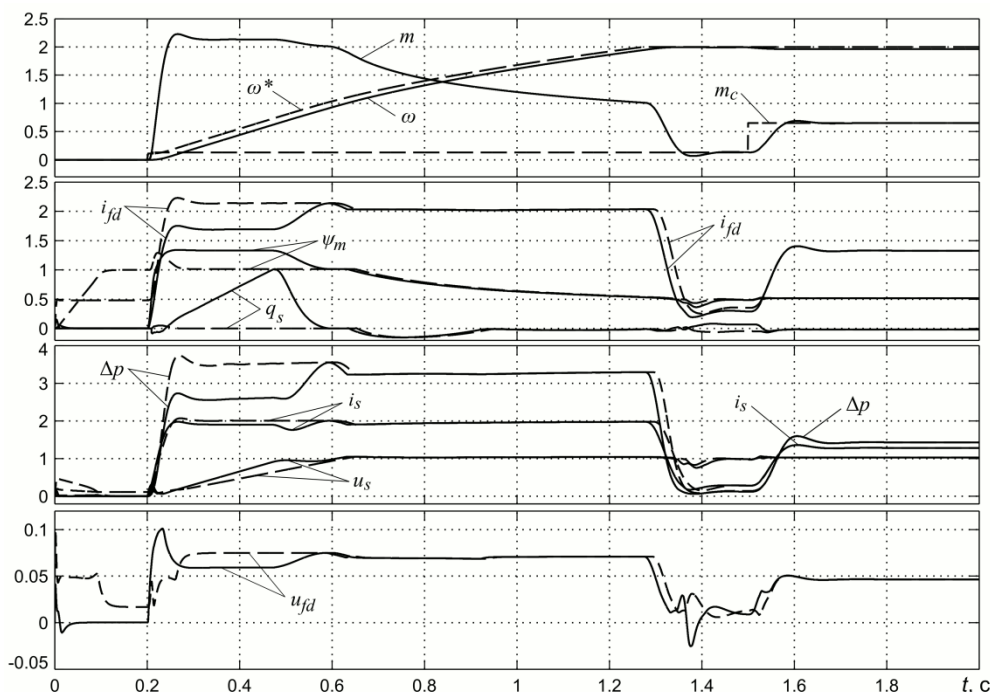


Рис. 5. Динамика синхронного электропривода при реализации традиционных режимов управления (штриховые линии) и при минимуме потерь в нижней зоне (сплошные линии)

При более полном сопоставительном анализе наибольшие различия наблюдаются на этапе разгона, либо работы двигателя в нижней зоне (интервал времени от 0,2 до 0,5 с). Здесь

минимизация потерь при переменном потоке обеспечивает снижение суммарных потерь Δp на 35%, тока возбуждения i_{fd} на 20%, что улучшает тепловой режим СД и в особенности

– нагрев его обмотки возбуждения. Ток якоря (i_s) увеличивается незначительно, примерно на 8%. Пусковой режим характеризуется сравнительно небольшими форсировками напряжений на обмотках якоря (u_s) и возбуждения (u_{fd}). Наибольшее напряжение на обмотке возбуждения наблюдается в начальной стадии разгона СД и превышает напряжение в режиме $e_s = e_{s,гр}$ на 27%. Система обеспечивает плавный переход от режима минимальных потерь при переменном токе к режиму постоянства ЭДС якоря (в промежуточной зоне на интервале времени от 0,5 до 0,6 с). В верхней зоне главное потокосцепление и электромагнитный момент уменьшаются, напряжение статора стабилизируется, реактивная мощность q_s снижается до нуля и процессы регулирования соответствуют режиму постоянства ЭДС обмотки якоря. Изложенное выше позволяет сделать вывод о возможности и целесообразности

использования режима управления с минимизацией потерь при переменном токе в системах двухзонного частотного регулирования скорости синхронных электроприводов.

Библиографический список

1. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования в электроприводах переменного тока [Текст] / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, Л.М. Тарасенко, И.С. Кузнецов, и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
2. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод [Текст] / А.М. Вейнгер. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
3. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока [Текст] / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; Под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 220 с.

Сведения об авторах

Шрейнер Рудольф Теодорович – Российский государственный профессионально-педагогический университет, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры Электрооборудование и автоматизация промышленных предприятий, (343) 375-33-76, e-mail: r_shreiner@mail.ru

Поляков Владимир Николаевич – Уральский федеральный университет им. первого Президента РФ Ельцина Б.Н., д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры Электропривод и автоматизация промышленных предприятий, (343) 375-46-46, e-mail: v.n.polyakov@urfu.ru

Медведев Алексей Владимирович – Российский государственный профессионально-педагогический университет, аспирант кафедры Электрооборудование и автоматизация промышленных предприятий, e-mail: meda1ex@mail.ru

УДК 622.323:621.313

УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОМАШИНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

М.С.ЕРШОВ, д-р техн. наук, А.В. ЕГОРОВ, д-р техн. наук, А.А. ТРИФОНОВ, канд. техн. наук

Рассмотрены вопросы устойчивости многомашинных электротехнических систем (ЭТС) при возмущениях в электрических сетях. Предложены параметры и процедуры компьютерного моделирования, рассмотрены мероприятия по повышению устойчивости ЭТС.

Ключевые слова: провал напряжения, электротехническая система, электроприводы, устойчивость.

STABILITY OF MULTI-MOTOR INDUSTRIAL ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

M.S. ERSHOV, Doctor of Engineering, A.V. EGOROV, Doctor of Engineering, A.A. TRIFONOV, Candidate of Engineering

There are considered questions of electrotechnical systems stability at indignations in electric networks. Parameters and procedures of computer modeling are offered, actions for increase of electrotechnical systems stability are considered.

Keywords: voltage failure, electrotechnical system, electric drives, stability.

Проблема устойчивости электротехнических систем (ЭТС) впервые проявилась для крупных объектов переработки природного газа и газового конденсата. При

высокой частоте кратковременных возмущений в системах внешнего и внутреннего электроснабжения данная проблема является актуальной для различных промышленных