

УДК 62.503.51, 62.503.54, 62.503.55

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ТОКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.С. Ляпин^a

^a Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

Адрес для переписки: ACLyapin@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.05.16, принята к печати 12.06.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-731-737

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Ляпин А.С. Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 731–737. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-731-737

Аннотация

Представлены результаты моделирования машины двойного питания с токовым управлением по цепи ротора. Показаны наиболее перспективные области применения электроприводов на основе машины двойного питания и их достоинства. Представлена и рассмотрена функциональная схема электропривода на основе машины двойного питания с токовым управлением. Получены уравнения, необходимые для создания в математической модели подобной машины. Представлены выражения для проекций вектора тока ротора. Согласно полученным результатам, изменение проекций вектора тока ротора обеспечивает работу машины двойного питания с заданными значениями активной и реактивной мощности статора во всем диапазоне изменения скольжения. Рассмотрены статические характеристики машины двойного питания с токовым управлением. Проанализированы энергетические процессы, протекающие в машине. Подтверждена возможность работы машины двойного питания при токовом управлении по цепи ротора с заданными значениями активной и реактивной мощности статора. Представленные результаты могут найти применение для создания математических моделей и построения статических характеристик машин двойного питания с токовым управлением различной мощности.

Ключевые слова

машина двойного питания, математическая модель, статические характеристики, электропривод, токовое управление

MODEL STUDY OF THE DOUBLE FED MACHINE WITH CURRENT CONTROL

A.S. Lyapin^a

^a Baltic State Technical University “Voenmekh” n. a. D. F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: ACLyapin@yandex.ru

Article info

Received 02.05.16, accepted 12.06.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-731-737

Article in Russian

For citation: Lyapin A.S. Model study of the double fed machine with current control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 731–737. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-731-737

Abstract

The paper deals with modeling results of the double fed induction machine with current control in the rotor circuit. We show the most promising applications of electric drives on the basis of the double fed induction machine and their advantages. We present and consider functional scheme of the electric drive on the basis of the double fed induction machine with current control. Equations are obtained for creation of such machine mathematical model. Expressions for vector projections of rotor current are given. According to the obtained results, the change of the vector projections of rotor current ensures operation of the double fed induction machine with the specified values of active and reactive stator power throughout the variation range of sliding motion. We consider static characteristics of double fed machine with current control. Energy processes proceeding in the machine are analyzed. We confirm the operation possibility of double fed induction machine with current control in the rotor circuit with given values of active and reactive stator power. The presented results can be used for creation of mathematical models and static characteristics of double fed machines with current control of various capacities.

Keywords

double fed induction machine, mathematical model, static characteristics, electric drive, current control

Введение

Электроприводы на основе машины двойного питания (МДП) обладают такими достоинствами, как высокое быстродействие, возможность регулирования коэффициента мощности в сети, возможность реализации двузонного регулирования частоты вращения ротора, равенство мощности управления и мощности скольжения [1], высокий КПД [2, 3]. Использование МДП в качестве генератора позволяет решить вопрос стабилизации параметров выходного напряжения при непостоянной частоте вращения вала генератора. Применение МДП перспективно в судовых валогенераторных установках [4], нагрузочных устройствах испытания электродвигателей двигателей внутреннего сгорания [5], малых гидроэлектростанциях [6], энергосберегающих электроприводах транспортных систем [7].

Разработка теории применения МДП, принципов аппаратного исполнения электроприводов на базе этих машин началась в середине прошлого века [8]. Основы теории отражены в работах советских и российских ученых М.М. Ботвинника, Ю.Г. Шакаряна, Н.Н. Блоцкого, И.А. Лабунец, О.С. Хватова и других [9–13]. Теоретические исследования и эффективность применения МДП были подтверждены на промышленных установках большой мощности, созданных в СССР [14, 15]. На момент создания теоретических основ использования МДП не существовало средств программного моделирования, позволяющих проводить модельные исследования всевозможных режимов работы машины двойного питания. Изучение свойств МДП и ее электромагнитных и энергетических характеристик с применением современных компьютерных средств моделирования чрезвычайно важно для понимания процессов, происходящих в МДП, и построения энергетически эффективных систем.

Целью настоящей работы является исследование токового управления МДП, включающее:

- получение уравнений для проекций вектора тока ротора, позволяющих обеспечить работу МДП с постоянной активной и реактивной мощностью статора;
- анализ статических характеристик МДП с токовым управлением, работающей в двигательном и генераторном режимах.

Функциональная схема электропривода с токовым управлением машиной двойного питания представлена на рис. 1.

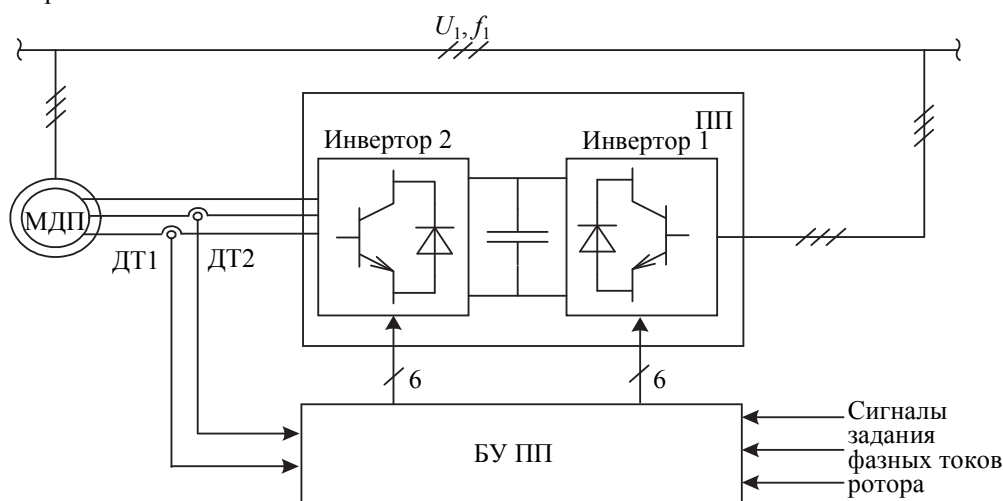


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с токовым управлением машиной двойного питания:
 БУ ПП – блок управления полупроводникового преобразователя, U_1 – амплитуда напряжения питающей сети, f_1 – частота напряжения сети, 6 – число электрических связей

Как показано на рис. 1 статорные обмотки МДП подключены непосредственно к питающей сети ($U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$). Роторные обмотки МДП запитаны от полупроводникового преобразователя (ПП). Блок управления ПП реализует скользящий режим по току ротора (токовый коридор). Сигналы управления ключами выходного инвертора (инвертор 2) формируются по сигналам рассогласования заданных и фактических значений фазных токов ротора. Для измерения фактических значений фазных токов ротора в цепях питания ротора установлены датчики тока (ДТ1, ДТ2). Сигналы рассогласования, вычисленные как разность между заданным и фактическим значением фазного тока ротора, поступают на вход релейных регуляторов. Релейные регуляторы формируют сигналы управления ключами выходного инвертора. Входной инвертор (инвертор 1) на звене постоянного тока ПП обеспечивает поддержание постоянного напряжения. Полупроводниковый преобразователь в цепи ротора должен обеспечивать двухсторонний обмен энергией между обмоткой ротора и питающей сетью.

Уравнения для создания математической модели машины двойного питания с токовым управлением

В качестве основы при получении уравнений для математической модели МДП с токовым управлением будет использована система уравнений, полученная в работе [16].

Для придания результатам исследования большей наглядности векторы и параметры МДП в системе уравнений (1) записаны в относительных единицах (per unit):

$$\begin{aligned} U_{1pu} &= R_{1pu} i_{1pu} + j\omega_{1pu} \Psi_{1pu}; \\ U_{2pu} &= R_{2pu} i_{2pu} + j\omega_{1pu} s \Psi_{2pu}; \\ \Psi_{1pu} &= L_{1pu} i_{1pu} + L_{mpu} i_{2pu}; \\ \Psi_{2pu} &= L_{2pu} i_{2pu} + L_{mpu} i_{1pu}, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{1pu} , U_{2pu} – векторы напряжения статора и ротора; Ψ_{1pu} , Ψ_{2pu} , i_{1pu} , i_{2pu} – векторы потокоцеплений, токов статора и ротора; R_{1pu} , R_{2pu} – активные сопротивления статора и ротора; L_{1pu} , L_{2pu} – индуктивности статора и ротора; L_{mpu} – главная индуктивность намагничивающего контура; ω_{1pu} – угловая частота поля статора ($\omega_{1pu}=1$); s – скольжение; j – мнимая единица.

В качестве переменных состояния МДП с токовым управлением будут использованы векторы напряжения, тока статора и ротора. С целью исключения из системы уравнений (1) векторов потокоцепления статора и ротора необходимо третье и четвертое уравнения подставить в первое и второе уравнения системы соответственно. В результате будут получены следующие уравнения

$$\begin{aligned} U_{1pu} &= R_{1pu} i_{1pu} + j(L_{1pu} i_{1pu} + L_{mpu} i_{2pu}); \\ U_{2pu} &= R_{2pu} i_{2pu} + js(L_{2pu} i_{2pu} + L_{mpu} i_{1pu}). \end{aligned} \quad (2)$$

После упрощения выражения (2) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} U_{1pu} &= R_{1pu}(1 + jT_{1pu})i_{1pu} + jL_{mpu}i_{2pu}; \\ U_{2pu} &= jsL_{mpu}i_{1pu} + R_{2pu}(1 + jT_{2pu}s). \end{aligned} \quad (3)$$

где $T_{1pu} = \frac{L_{1pu}}{R_{1pu}}$ – постоянная времени статора; $T_{2pu} = \frac{L_{2pu}}{R_{2pu}}$ – постоянная времени ротора. Как показано на

рис. 1, статорные обмотки МДП подключены непосредственно к питающей сети трехфазного напряжения. И поэтому частота напряжения статора и амплитуда напряжения известны. Следовательно, вектор напряжения статора в установившемся режиме работы известен. Питание роторных цепей осуществляется от ПП, работающего в режиме источника тока и обеспечивающего равенство значений фазных токов ротора заданным значениям. Следовательно, вектор тока ротора известен и определяется заданными значениями фазных токов ротора. Таким образом, в выражениях (3) имеются два неизвестных вектора: U_{2pu} , i_{1pu} .

Для нахождения неизвестных векторов необходимо из первого уравнения системы (3) выразить вектор тока статора, а из второго – вектор напряжения ротора. В результате преобразований будут получены следующие равенства:

$$\begin{aligned} i_{1pu} &= \frac{U_{1pu} - jL_{mpu}i_{2pu}}{R_{1pu}(1 + jT_{1pu})}; \\ U_{2pu} &= jsL_{mpu} \left(\frac{U_{1pu} - jL_{mpu}i_{2pu}}{R_{1pu}(1 + jT_{1pu})} \right) + R_{2pu}(1 + jT_{2pu}s)i_{2pu}. \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы найти выражения для проекций векторов тока статора и напряжения ротора необходимо в правой части уравнений системы (4) умножить числитель и знаменатель на комплексно сопряженное знаменателю выражение $(1 - jT_{1pu})$. После умножения необходимо векторы заменить соответствующими комплексными выражениями, и выполнить разделение мнимых и вещественных частей. При выполнении преобразований необходимо учесть то, что вектор напряжения статора МДП ориентирован по оси x системы координат x – y , вращающейся синхронно с угловой частотой статора ($U_{1xpu} = |U_{1pu}|$, $U_{1ypu} = 0$). В результате будут получены следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 i_{1xpu} &= \frac{U_{1xpu} + L_{mпу} i_{2yпу} - T_{1пу} L_{mпу} i_{2xпу}}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)}; \\
 i_{1yпу} &= \frac{-L_{mпу} i_{2xпу} - T_{1пу} U_{1xпу} - L_{mпу} T_{1пу} i_{2yпу}}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)}; \\
 U_{2xпу} &= \frac{sL_{mпу} T_{1пу} U_{1xпу} + i_{2xпу} (sL_{mпу}^2 + R_{1пу} R_{2пу} (1 + T_{1пу}^2)) + i_{2yпу} (T_{1пу} L_{mпу}^2 - R_{1пу} R_{2пу} T_{1пу} (1 + T_{1пу}^2))}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)}; \\
 U_{2yпу} &= \frac{sL_{mпу} U_{1xпу} + i_{2yпу} (sL_{mпу}^2 + R_{1пу} R_{2пу} (1 + T_{1пу}^2)) - i_{2xпу} (T_{1пу} L_{mпу}^2 - R_{1пу} R_{2пу} T_{1пу} (1 + T_{1пу}^2))}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)},
 \end{aligned} \quad (5)$$

где $i_{1xпу}$, $i_{1yпу}$, $i_{2xпу}$, $i_{2yпу}$ – проекции векторов токов статора и ротора на оси системы координат x – y ; $U_{1xпу}$, $U_{1yпу}$, $U_{2xпу}$, $U_{2yпу}$ – проекции векторов напряжений статора и ротора на оси системы координат x – y .

Из системы уравнений (5) видно, что проекции вектора тока статора не зависят от скольжения.

Работа МДП с постоянной активной и реактивной мощностью статора

Работа МДП в рассматриваемом режиме работы во всем диапазоне скольжений достигается путем изменения требуемым образом проекций вектора тока ротора.

При выбранной ориентации вектора напряжения статора выражения для вычисления активной и реактивной мощностей статора запишутся следующим образом [16]

$$\begin{aligned}
 P_{1пу} &= 1,5 U_{1xпу} i_{1xпу}; \\
 Q_{1пу} &= -1,5 U_{1xпу} i_{1yпу},
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{1пу}$, $Q_{1пу}$ – активная и реактивная мощности статора МДП.

Сопоставив первые и вторые уравнений выражений (5)–(6), можно записать следующие равенства:

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{1пу}}{1,5 U_{1xпу}} &= \frac{U_{1xпу} + L_{mпу} i_{2yпу} - T_{1пу} L_{mпу} i_{2xпу}}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)}, \\
 -\frac{Q_{1пу}}{1,5 U_{1xпу}} &= \frac{-L_{mпу} i_{2xпу} - T_{1пу} U_{1xпу} - L_{mпу} T_{1пу} i_{2yпу}}{R_{1пу} (1 + T_{1пу}^2)}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Решением системы уравнений (7) относительно проекций вектора тока ротора являются следующие равенства:

$$\begin{aligned}
 i_{2xпу} &= \frac{1}{1,5 U_{1xпу} L_{mпу}} (Q_{1пу} R_{1пу} - T_{1пу} R_{1пу} P_{1пу}); \\
 i_{2yпу} &= \frac{1}{1,5 U_{1xпу} L_{mпу}} (R_{1пу} P_{1пу} - 1,5 U_{1xпу}^2 + T_{1пу} R_{1пу} Q_{1пу}).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Из выражений (8) видно, что проекции вектора тока ротора на оси координат не зависят от скольжения и определяются только параметрами машины и заданными значениями активной и реактивной мощности статора.

Уравнений (5), (6), (8) достаточно для создания в пакете MATLAB математической модели МДП с токовым управлением, работающей с постоянными значениями активной и реактивной мощности статора. В модели вычисления активной и реактивной мощностей ротора МДП, механической мощности, электромагнитного момента и потерь в меди МДП будут производиться согласно следующим выражениям [16]:

$$\begin{aligned}
 M_{пу} &= 1,5 p L_{mпу} (i_{1yпу} i_{2xпу} - i_{1xпу} i_{2yпу}); \\
 \Delta P_{пу} &= 1,5 (R_{1пу} |i_{1пу}|^2 + R_{2пу} |i_{2пу}|^2); \\
 P_{2пу} &= 1,5 (U_{2xпу} i_{2xпу} + U_{2yпу} i_{2yпу}); \\
 Q_{2пу} &= 1,5 (U_{2yпу} i_{2xпу} - U_{2xпу} i_{2yпу}); \\
 P_{мпу} &= M_{пу} \omega_{пу},
 \end{aligned}$$

где $M_{пу}$ – электромагнитный момент; $\Delta P_{пу}$ – мощность потерь в меди; $P_{2пу}$, $Q_{2пу}$ – активная и реактивная мощность ротора; p – число пар полюсов; $P_{мпу}$ – механическая мощность; $\omega_{пу}$ – угловая частота вращения ротора.

- При рассмотрении результатов моделирования необходимо учесть, что [1]:
- активная мощность положительна, когда источник отдает энергию, и отрицательна, когда источник потребляет энергию;
 - реактивная мощность в источнике положительна (индуктивная), когда напряжение опережает ток, и отрицательна (емкостная), когда напряжение отстает от тока;
 - механическая мощность (электромагнитный момент) положительна в двигательном режиме и отрицательна в генераторном режиме.

Статические характеристики МДП мощностью 250 кВт [17] с токовым управлением, полученные на математической модели, представлены на рис. 2. При моделировании заданные значения активной и реактивной мощностей статора были приняты равными -1 и 1 соответственно.

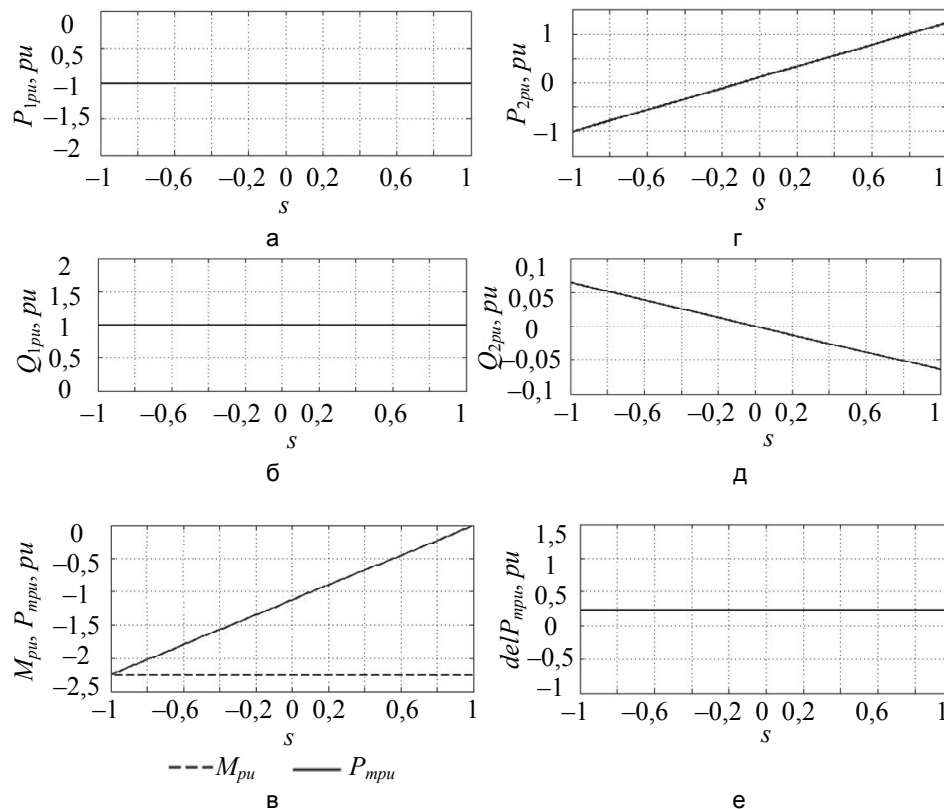


Рис. 2. Статические характеристики машины двойного питания с токовым управлением при $P_{1pu} = -1$, $Q_{1pu} = 1$: график активной мощности статора ($P_{1pu}=f(s)$) (а); график реактивной мощности статора ($Q_{1pu}=f(s)$) (б); графики электромагнитного момента ($M_{пу}=f(s)$), механической мощности ($P_{мпу}=f(s)$) (в); график активной мощности ротора ($P_{2pu}=f(s)$) (г); график реактивной мощности ротора ($Q_{2pu}=f(s)$) (д); график потерь в меди ($delP_{пу} = \Delta P_{пу} = f(s)$) (е)

Из рис. 2 видно, что активная и реактивная мощности статора МДП во всем диапазоне изменения скольжения равны заданным значениям. Таким образом, изменение проекций вектора тока ротора МДП согласно выражениям (8) обеспечивает работу машины с постоянной активной и реактивной мощностью статора.

Из статических характеристик следует, что при отрицательных значениях скольжения механическая мощность, приложенная к валу машины, через обмотки статора и ротора, за исключением потерь, передается в сеть.

При положительных значениях скольжения, как видно из рис. 2, МДП по цепи ротора потребляет активную мощность из сети. Таким образом, происходит компенсация снижения механической мощности и обеспечивается поддержание заданного значения активной мощности статора. Так, например, при $s=0,8$ активная мощность, потребляемая по цепи ротора, равна активной мощности, отдаваемой в сеть статором МДП, а механическая энергия расходуется на потери. Для исследуемого режима работы МДП можно сделать вывод о том, что работа МДП при больших положительных значениях скольжения не целесообразна. Такой режим работы МДП может быть использован в генераторных установках.

На рис. 3 представлены статические характеристики МДП при изменении проекций вектора тока ротора согласно выражениям (8). При моделировании заданные значения активной и реактивной мощности статора приняты равными единице.

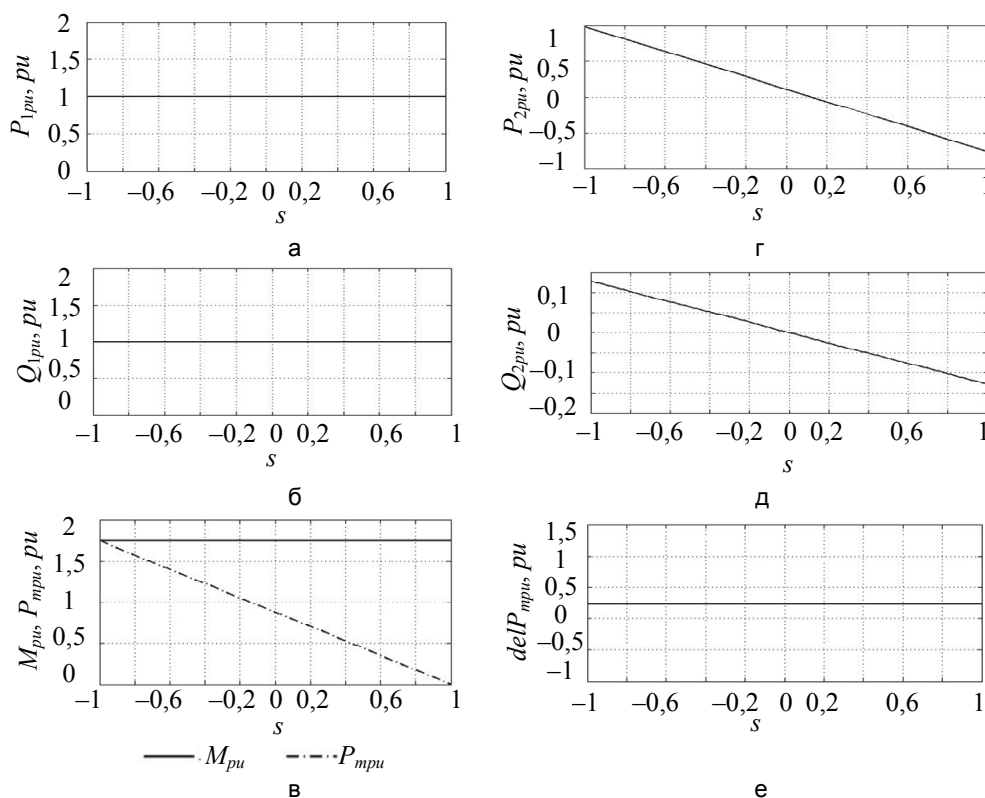


Рис. 3. Статические характеристики машины двойного питания с токовым управлением при $P_{1pu}=1, Q_{1pu}=1$: активная мощность статора ($P_{1pu}=f(s)$) (а); реактивная мощность статора ($Q_{1pu}=f(s)$) (б); электромагнитный момент ($M_{pu}=f(s)$), механическая мощность ($P_{mru}=f(s)$) (в); активная мощность ротора ($P_{2pu}=f(s)$) (г); реактивная мощность ротора ($Q_{2pu}=f(s)$) (д); потери в меди ($delP_{pu}=\Delta P_{pu}=f(s)$) (е)

Из статических характеристик, приведенных на рис. 3, следует, что при положительных значениях скольжения (за исключением малых значений) активная мощность ротора отдается в сеть. При этом активная мощность статора равна заданному значению. Таким образом, МДП с токовым управлением при положительных скольжениях имеет более высокий КПД, чем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Можно сделать вывод о том, что при увеличении скольжения КПД машины значительно не снижается. Особенно это проявляется в области больших значений скольжения. Как видно из графиков, при $s=1$ активная мощность, потребляемая от сети обмотками статора, за исключением потерь, через роторные обмотки передается в сеть. При этом МДП создает электромагнитный момент. Режим работы МДП с токовым управлением в области положительных скольжений может быть использован при создании энергетически эффективных электроприводов большой мощности.

При отрицательных значениях скольжения, как видно из рис. 3, МДП работает с постоянным моментом на частотах вращения ротора выше синхронной частоты. Это приводит к тому, что механическая мощность МДП превышает активную мощность статора. Увеличение механической мощности компенсируется потреблением роторными обмотками МДП активной мощности от сети. Таким образом, обеспечивается выполнение условия энергетического баланса.

Заключение

Получены уравнения, необходимые для создания математической модели машины двойного питания с токовым управлением. Определены выражения, в соответствии с которыми должны изменяться проекции вектора тока ротора для обеспечения режима работы машины двойного питания с заданными значениями активной и реактивной мощностей статора во всем диапазоне изменения скольжения. Рассмотрены статические характеристики машины двойного питания при ее работе в генераторном и двигательном режиме, а также происходящие в машине двойного питания энергетические процессы.

На основании выполненного исследования можно сделать вывод о том, что токовое управление машиной двойного питания позволяет получить качественное изменение статических характеристик машины. Такой способ управления машиной двойного питания может иметь перспективы для широкого практического применения в генераторных и двигательных установках на основе машины двойного питания.

Полученные в работе результаты должны быть подтверждены на более сложной виртуальной модели машины двойного питания с токовым управлением.

Литература

1. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab–Simulink. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
2. Ляпин А.С. Структурная модель, модельное исследование динамики электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. №4(80). С. 60–64.
3. Безруких П.П. Ветроэнергетика. М.: Энергия, 2010. 320 с.
4. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки. СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. 176 с.
5. Хватов О.С. Управляемые генераторные комплексы на основе машины двойного питания. Н.Новгород: НГТУ, 2000. 202 с.
6. Хватов С.В., Титов В.Г., Поскробко А.А., Цыпкайкин В.Ф. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства. М.: Энергоатомиздат, 1986. 145с.
7. Герман-Галкин С.Г. Аналитическое и модельное исследование асинхронных машин с фазным ротором при положительных скольжениях // Электротехника. 2015. №7. С. 58–65.
8. Шакарян Ю.Г. Вопросы теории и промышленной эксплуатации асинхронизированных синхронных машин // Труды ВНИИЭ. 1981. № 61. С. 5–8.
9. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Госэнергоиздат, 1960. 38 с.
10. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.
11. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.
12. Вопросы теории и промышленной эксплуатации асинхронизированных синхронных машин / Под ред. Н.Н. Блоцкого и др. М.: Энергоатомиздат, 1981. 102 с.
13. Лабунец И.А., Лохматов А.П., Шакарян Ю.Г. Режимы работы, статические и динамические характеристики асинхронизированных турбогенераторов. Киев, 1987. 45 с.
14. Захри М.И. Промышленные испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 МВА // Электричество. 1973. №4. С. 52–54.
15. Никитин П.З. и др. Асинхронизированный синхронный электропривод цементной мельницы // Электричество. 1978. №3. С. 81–82.
16. Ляпин А.С. Получение и анализ статических характеристик машины двойного питания при питании роторных обмоток от источника напряжения // Известия вузов. Электротехника 2014. №1. С. 30–34.
17. Abad G., Lopez J., Rodriguez M. A., Iwanski G. Double Fed Induction Machine. Modeling and Control for wind Energy Generation. Wiley, 2011. 633 p.

Ляпин Анатолий Сергеевич

– аспирант, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, ACLyapin@yandex.ru

Anatoliy S. Lyapin

– postgraduate, Baltic State Technical University “Voenmekh” n. a. D. F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, ACLyapin@yandex.ru